
DIPLOMARBEIT

Herr Ing.
Gert Grillitsch

**Composites im Automobilbau;
Kostenstrukturen im Leichtbau**

Stiwoll, 2013

DIPLOMARBEIT

Composites im Automobilbau; Kostenstrukturen im Leichtbau

Autor:
Herr Ing.

Gert Grillitsch

Studiengang:
Wirtschaftsingenieurwesen

Seminargruppe:
KW08sGA

Erstprüfer:
Prof. Dr. rer. oec. Johannes Stelling

Zweitprüfer:
Prof. Dr. rer. pol. Andreas Hollidt

Einreichung:
Mittweida, 28.02.2013

Verteidigung/Bewertung:
Graz, 2013

DIPLOMA THESIS

composites in automotive engineering; cost structures in lightweight constructions

author:
Mr. Ing.

Gert Grillitsch

course of studies:
Economics for Engineers

seminar group:
KW08sGA

first examiner:
Prof. Dr. rer. oec. Johannes Stelling

second examiner:
Prof. Dr. rer. pol. Andreas Hollidt

submission:
Mittweida, 28.02.2013

defence/ evaluation:
Graz, 2013

Bibliografische Beschreibung:

Gert, Grillitsch:

Composites im Automobilbau; Kostenstrukturen im Leichtbau. - 2013. - 10, 54, 36 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Wirtschaftswissenschaften,
Diplomarbeit, 2013

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse verschiedener Leichtbaukonzepte. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Kostenstrukturen der Fertigungsverfahren von Faser-Kunststoff-Verbunden.

Das Hauptziel dabei war, herauszufinden welche Leichtbaukonzepte das meiste Potential für eine kostengünstige Serienfertigung aufweisen. Die beste spezifische Festigkeit und spezifische Steifigkeit lässt sich dabei mit CFK erzielen.

Nur wenn hier eine Kostensenkung auf unter 15 € pro Kilogramm erreicht wird, ist eine Verwendung in der automobilen Großserie denkbar. Um diesen Wert zu erreichen müssen aber sowohl die Materialkosten als auch die Fertigungskosten deutlich reduziert werden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse sollen später Berechnungsmethoden und Beurteilungskriterien, für die in Frage kommenden Leichtbau-Technologien, entwickelt werden.

Abstract:

In this thesis various lightweight engineering concepts are examined and evaluated. The cost structures of manufacturing processes for fiber reinforced plastics are in particular focus.

Thereby the main object lies on the analysis, which lightweight engineering concepts offer the greatest potential for an economically mass production. The highest specific strength and stiffness is achievable with carbon fiber reinforced plastics.

However, this material will be worth being used in the automobile series production only by reducing the costs to under 15 € per kilogram. Therefore the material and manufacturing costs have to be decreased substantially.

Based on these findings, calculation methods and evaluation criteria for the appropriate lightweight technologies can be developed prospectively.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Auftraggeber	2
1.3 Aufgabenstellung	2
1.4 Zielsetzung	3
2 Leichtbaumotivationen	4
3 Leichtbauwerkstoffe	7
3.1 Stahl	7
3.2 Aluminium	8
3.3 Magnesium	9
3.4 Titan	10
3.5 Faserverstärkte Metalle	11
3.6 Faser-Kunststoff-Verbunde	11
3.6.1 Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)	12
3.6.2 Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK)	13
3.6.3 Aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK)	15
3.7 Spezifische Festigkeit und Steifigkeit	17
4 Herstellungsverfahren von FKV	19
4.1 Handlaminieren/Faserspritzen	19
4.2 Nasspressen	20
4.3 Wickelverfahren	21
4.4 Pultrusion	22
4.5 Injektionsverfahren	22

4.6	Automatisierte Legeverfahren.....	23
4.7	Langfaserinjektionsverfahren (LFI)	24
4.8	Hochdruckpressen von GMT / LFT.....	25
4.9	Heißpressen von SMC / BMC.....	26
4.10	Spritzgießen von BMC.....	27
5	Der globale CFK-Markt.....	28
5.1	Der Kohlenstofffasermarkt.....	28
5.2	Der CFK-Markt	29
5.3	Ausblick – Kohlenstofffaserverbrauch in der Automobilindustrie.....	31
6	Grundsätzliches zur Kostenrechnung	33
6.1	Aufgaben der Kostenrechnung	33
6.2	Konzept der Zuschlagskalkulation	33
6.3	Begriff-Definitionen	34
6.3.1	Kostenstelle.....	34
6.3.2	Kostenträger.....	34
6.3.3	Einzelkosten.....	34
6.3.4	Gemeinkosten	34
6.3.5	Materialkosten	34
6.3.6	Fertigungskosten.....	34
6.3.7	Herstellkosten	35
6.3.8	Selbstkosten.....	35
7	Kostenrechnung einer CFK-Antriebswelle	36
7.1	Eingabedaten	36
7.2	Kostenarten.....	42
7.3	Maschinenstundenzuschlagssätze	44
7.4	Maschinenstundensatzkalkulation	46
7.5	Ergebnisse	48
8	Conclusio.....	50
9	Ausblick	51
Literatur		52
Anlagen		54
Anlagen, Festigkeitskennwerte Stahl		A-1

Anlagen, Festigkeitskennwerte Aluminium.....	A-10
Anlagen, Festigkeitskennwerte Magnesium.....	A-35
Anlagen, Festigkeitskennwerte Titan.....	A-36
Selbstständigkeitserklärung	A-37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gewichtstreiber im Automobilbau	4
Abbildung 2: Gewichtsentwicklung u. Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs bei Fahrzeugen	5
Abbildung 3: Bedeutung des Leichtbaus im Fahrzeugbau	5
Abbildung 4: Stahlkarosserie Ultra-Light Steel Auto Body (ULSAB)	7
Abbildung 5: Aluminiumkarosserie Jaguar XJ.....	8
Abbildung 6: Autotür aus Magnesium.....	9
Abbildung 7: Titanabgasanlage	10
Abbildung 8: Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahme der gebräuchlichen Verstärkungsfasern	11
Abbildung 9: Glasfaser in Epoxidharz-Matrix	12
Abbildung 10: Elementarzelle des Graphitkristalls	14
Abbildung 11: Spezifische Festigkeit u. Steifigkeit von Metallen und Faser-Kunststoff-Verbunden	17
Abbildung 12: Faserspritzen eines Wohnmobildachs	19
Abbildung 13: Hydraulische Oberkolben-Schiebetisch Presse	20
Abbildung 14: Ringfadenaue	21
Abbildung 15: Horizontal Pultrusions-Verfahren	22
Abbildung 16: Qualitativer Verlauf eines RTM-Zyklus.....	23
Abbildung 17: CNC-gesteuerte Roboterablage.....	24
Abbildung 18: CNC-gesteuerter Roboterspritzkopf.....	25
Abbildung 19: Anwendungen im Automobilbereich.....	26

Abbildung 20: Werkzeug mit Vakuumpresstechnik.....	26
Abbildung 21: CF-Kapazität / Aufteilung nach Regionen (2011)	28
Abbildung 22: Globaler Bedarf von Kohlenstofffasern in Tonnen 2008-2020 (*Schätzung)	29
Abbildung 23: Globaler CFK-Bedarf in Tonnen 2008-2020 (*Schätzungen)	29
Abbildung 24: Aufteilung der Herstellverfahren / Halbzeuge für CFK (2011)	30
Abbildung 25: Globaler CFK-Verbrauch nach Anwendungen (2011)	31
Abbildung 26: CF-Verbrauch im Automobilbau in Tonnen (*Schätzungen)	32
Abbildung 27: Vergleich-Kostenverteilung	48
Abbildung 28: Vergleich-Herstellkosten	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialeigenschaften Stahl.....	8
Tabelle 2: Materialeigenschaften Aluminium	8
Tabelle 3: Materialeigenschaften Magnesium.....	9
Tabelle 4: Materialeigenschaften Titan	10
Tabelle 5: Materialeigenschaften Glasfaser	13
Tabelle 6: Materialeigenschaften GFK.....	13
Tabelle 7: Materialeigenschaften Kohlenstofffaser	15
Tabelle 8: Materialeigenschaften CFK.....	15
Tabelle 9: Materialeigenschaften Aramidfaser	16
Tabelle 10: Materialeigenschaften AFK	16
Tabelle 11: Kohlenstofffaserkosten	37
Tabelle 12: Eingabedaten für Kostenrechnung.....	38
Tabelle 13: Eingabedaten für Kostenrechnung (Fortsetzung)	39
Tabelle 14: Berechnungen für Kostenrechnung.....	40
Tabelle 15: Berechnungen für Kostenrechnung (Fortsetzung).....	41
Tabelle 16: Kostenarten	42
Tabelle 17: Kostenarten (Fortsetzung)	43
Tabelle 18: Zuschlagsätze.....	45
Tabelle 19: Maschinenstundensatzkalkulation.....	46
Tabelle 20: Maschinenstundensatzkalkulation (Fortsetzung).....	47

Tabelle 21: Festigkeitswerte für unlegierten Baustahl und schweißgeeigneten Feinkornbaustahl.....		A-1
Tabelle 22: Festigkeitswerte für Vergütungsstahl		A-2
Tabelle 23: Festigkeitswerte für Vergütungsstahl		A-3
Tabelle 24: Festigkeitswerte für Einsatzstahl und Nitrierstahl		A-4
Tabelle 25: Festigkeitswerte für nichtrostenden Stahl.....		A-5
Tabelle 26: Festigkeitswerte für Stahl-Schmiedestücke.....		A-6
Tabelle 27: Festigkeitswerte für Stahlguss		A-7
Tabelle 28: Festigkeitswerte für Gusseisen		A-8
Tabelle 29: Festigkeitswerte für Temperguss		A-9
Tabelle 30: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 1		A-10
Tabelle 31: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 2.....		A-11
Tabelle 32: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 3.....		A-12
Tabelle 33: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 4.....		A-13
Tabelle 34: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 5.....		A-14
Tabelle 35: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 6.....		A-15
Tabelle 36: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 7.....		A-16
Tabelle 37: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 8.....		A-17
Tabelle 38: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 9.....		A-18
Tabelle 39: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 10.....		A-19
Tabelle 40: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 11		A-20
Tabelle 41: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 12.....		A-21
Tabelle 42: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 13.....		A-22

Tabelle 43: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 14.....	A-23
Tabelle 44: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 14.....	A-24
Tabelle 45: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 15.....	A-25
Tabelle 46: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 16.....	A-26
Tabelle 47: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 17.....	A-27
Tabelle 48: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 18.....	A-28
Tabelle 49: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 19.....	A-29
Tabelle 50: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 20.....	A-30
Tabelle 51: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 21.....	A-31
Tabelle 52: Festigkeitswerte für Aluminiumgusswerkstoff 1.....	A-32
Tabelle 53: Festigkeitswerte für Aluminiumgusswerkstoff 2.....	A-33
Tabelle 54: Festigkeitswerte für Aluminiumgusswerkstoff 3.....	A-34
Tabelle 55: Festigkeitswerte für Magnesiumlegierungen	A-35
Tabelle 56: Festigkeitswerte für Titanlegierungen	A-36

Abkürzungsverzeichnis

1 K	1.000 Filamente
24 K	24.000 Filamente
400 K	400.000 Filamente
AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
Alu	Aluminium
BMC	Bulk Moulding Compound
CF	Kohlenstofffaser
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
cm³	Kubikzentimeter
CNC	Computerized Numerical Control
CO₂	Kohlendioxid
dm³	Kubikdezimeter
E	Elastizitätsmodul
E_{fil}	Elastizitätsmodul parallel zur Faser
E_{f⊥}	Elastizitätsmodul quer zur Faser
E-Modul	Elastizitätsmodul
f	und folgende Seite
ff	und folgende Seiten
FGK	Fertigungsgemeinkosten
FKV	Faser-Kunststoff-Verbunde
g	Gramm
G	Schubmodul (auch Gleitmodul)
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GMT	Glasmatteverstärkte Thermoplaste
GPA	Gigapascal
GPA / g cm³	Gigapascal pro Gramm Kubikzentimeter
gr.	Gramm
gr./km	Gramm pro Kilometer
h	Stunde
HM	High Modulus
HT	High Tenacity
KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
km	Kilometer

kg/dm³	Kilogramm pro Kubikdezimeter
l	Liter
LFI	Long Fiber Injektion
LFT	Langfaserverstärkte Thermoplaste
l/100km	Liter pro 100 Kilometer
mech.	mechanisch
mm²	Quadratmillimeter
MPa	Megapascal
M-Std.	Maschinenstunden
N	Newton (Einheit)
NEFZ	neuer europäischer Fahrzyklus
N/mm²	Newton pro Quadratmillimeter
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
R_m	Zugfestigkeit
R_{p0,2}	0,2 %-Dehngrenze
R_{zB}	Zugfestigkeit
REM	Rasterelektronenmikroskop
RTM	Resin Transfer Moulding
SMC	Sheet Moulding Compound
t	Metrische Tonne
USA	United States of America
UV	Ultraviolett
u.	und
VW	Volkswagen
z. B.	zum Beispiel
ρ	Dichte
v	Querkontraktion
Σ	Summe

1 Einleitung

1.1 Motivation

Mehr Leistung, gesteigerte Sicherheit und immer größer werdender Komfort haben Autos schwer werden lassen.

Auf der ganzen Welt drohen den Automobilherstellern harte Strafen für Nichteinhaltung der CO₂ - Emissionen. Europäische Autohersteller müssen bis 2020 den CO₂ - Ausstoß ihrer Fahrzeuge auf unter 95 Gramm pro Kilometer senken - über kleinere Motoren, alternative Antriebe und vor allem leichtere Fahrzeuge.¹

Die gezielte Beeinflussung von Material- und Bauteileigenschaften war die Grundlage für neue Anwendungsbereiche und Technologien. In der Automobilindustrie werden die dominierenden Materialien Stahl und Eisen zunehmend durch Leichtbaumaterialien, wie Leichtmetalle oder Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV), ersetzt.

Um dieser Weiterentwicklung Rechnung zu tragen müssen demnach auch die Berechnungsmethoden an diese Technologien angepasst werden. Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit den Kostenstrukturen der einzelnen Leichtbaukonzepte, um auch für die Automobilindustrie umsetzbare Verfahren auszuwählen. Besonderes Augenmerk wird hier auf die Fertigungsverfahren mit Faser-Kunststoff-Verbunden gelegt, da in der Automobilindustrie eine klare Tendenz in diese Richtung zu erkennen ist.

Neu in dieser Diplomarbeit ist die Betrachtung von unterschiedlichen Leichtbaukonzepten, anhand ihrer Herstellkosten und dem Potential für die Serienfertigung. Hochleistungsfähige Werkstoffe, mit auf den Anwendungsfall abgestimmten Eigenschaften, sind ohne eine wirkliche Massenfertigung mit kurzen Taktzeiten in der Automobilindustrie nicht machbar.

¹ Vgl. Internet-Artikel Rees, Jürgen (2013)

1.2 Auftraggeber

Den Auftrag für diese Diplomarbeit erteilte mein Arbeitgeber, die *SinusPro GmbH*, für die ich seit mehr als 3 Jahren in der Simulation von Composites tätig bin.

Die 2008 gegründete *SinusPro GmbH* ist ein selbstständiges und unabhängiges Ingenieurbüro mit Sitz in *Graz*. Das Unternehmen bietet virtuelle Produktentwicklung und deren Absicherung auf Basis der Frontloading-Philosophie. Unsere Kernkompetenzen sind dabei in den Bereichen der technischen Berechnung und der numerischen Simulation zu finden.

Mit einem der höchsten Forschungs- und Entwicklungsanteilen in der Branche ist die *SinusPro GmbH* auch weiterhin bemüht, ihre Kunden bei Neuentwicklungen oder Produktoptimierungen zu unterstützen. Dabei geht der Trend deutlich in Richtung Faserverbundwerkstoffe und Hybridwerkstoffe.

1.3 Aufgabenstellung

Das Gewicht eines *VW Golf 1* hat sich bis heute beim *VW Golf 6* mehr als verdoppelt. Als Faustregel gilt: 100 Kilogramm Gewicht weniger, senken den Kraftstoffverbrauch um bis zu einem halben Liter. Spritverbrauch und CO₂ - Ausstoß sind unmittelbar miteinander verknüpft. In Anbetracht des künftigen Grenzwertes von 95 Gramm pro Kilometer ist nur noch ein Verbrauch von 3,6 Liter Diesel, oder 4,1 Liter Benzin zulässig.²

Um leichtere Autos produzieren zu können, testen Hersteller daher unterschiedliche Alternativen zum schweren Stahl. Faser-Kunststoff-Verbunde und Aluminium sind derzeit noch die Ausnahme von der Regel, werden aber sehr wohl in Serienfahrzeugen verbaut.

Die *SinusPro GmbH* hat sich daher das Ziel gesetzt, die vielversprechenden Entwicklungen im Gebiet des Automobil-Leichtbaus, auch auf der Simulationsseite abzubilden.

² Vgl. Internet-Artikel Rees, Jürgen (2013)

1.4 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Beurteilung von Leichtbauwerkstoffen und Fertigungsverfahren aufgrund ihres Potentials für die Serienfertigung. Als Hauptkriterium für diese Bewertung wird, wie in der Automobilindustrie üblich, der Kostenfaktor herangezogen. Aufgrund dieser Erkenntnisse sollen dann Berechnungsmethoden und Beurteilungskriterien für einzelne Leichtbau-Konzepte entwickelt werden.

2 Leichtbaumotivationen

Immer höher werdende Sicherheitsanforderungen, eine deutliche Steigerung der Zuverlässigkeit, Unmengen an Zusatzfunktionen und gesteigerter Komfort, lassen Autos von Generation zu Generation schwerer werden.

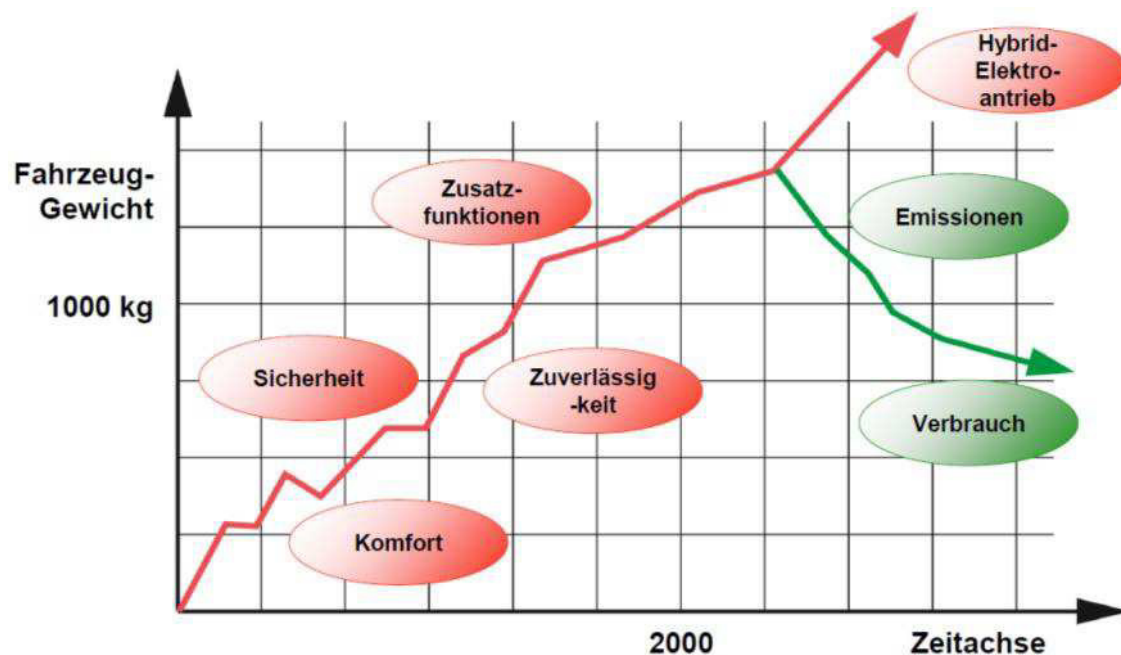


Abbildung 1: Gewichtstreiber im Automobilbau³

Dies lässt sich bei allen Modellen jedes Herstellers beobachten. Zur Veranschaulichung bietet sich hier das Modell *Golf* des *Volkswagen* Konzerns an. Der 1975 erstmals in seiner ersten Version produzierte *Golf* wurde damals ohne Radio, aber dafür mit einem Leergewicht unter 800 kg, ausgeliefert. Die aktuelle Variante des *Golfs* bringt mit erhöhten Sicherheitsstandards, vom Kunden geforderten Zusatzausstattungen, bereits 1200kg auf die Waage.⁴

³ Quelle: Drechsler, Klaus (2012), S.5

⁴ Vgl. Fachverband Ingenieurbüros in der WKO (2012), S.7

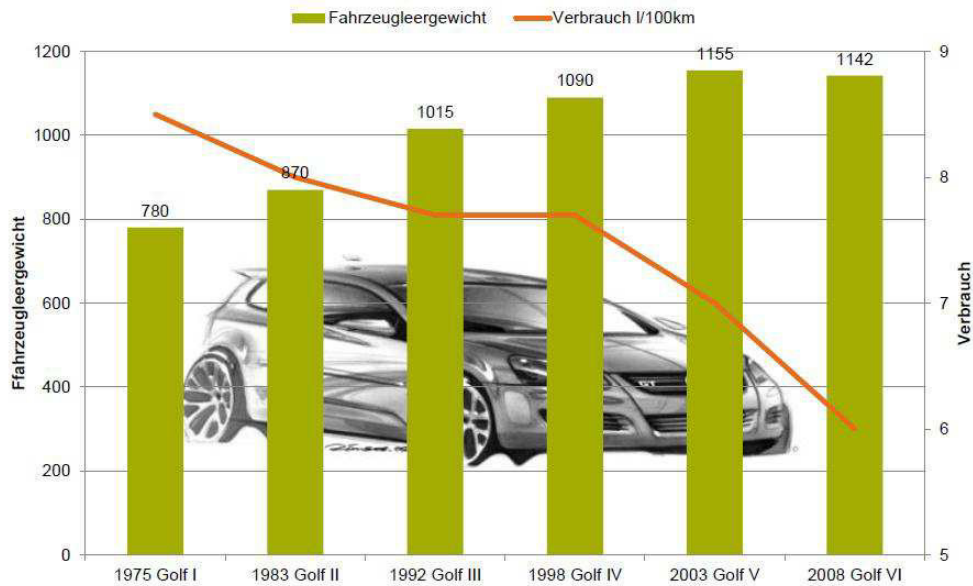


Abbildung 2: Gewichtsentwicklung u. Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs bei Fahrzeugen⁵

Mit diesem Trend soll jetzt aber Schluss sein. Nicht nur, dass sich das zusätzlich mitgeführte Gewicht negativ auf die Fahreigenschaften eines Fahrzeuges auswirkt, es führt auch zu einem höheren Kraftstoffverbrauch und damit zu einem erhöhten Schadstoffausstoß.

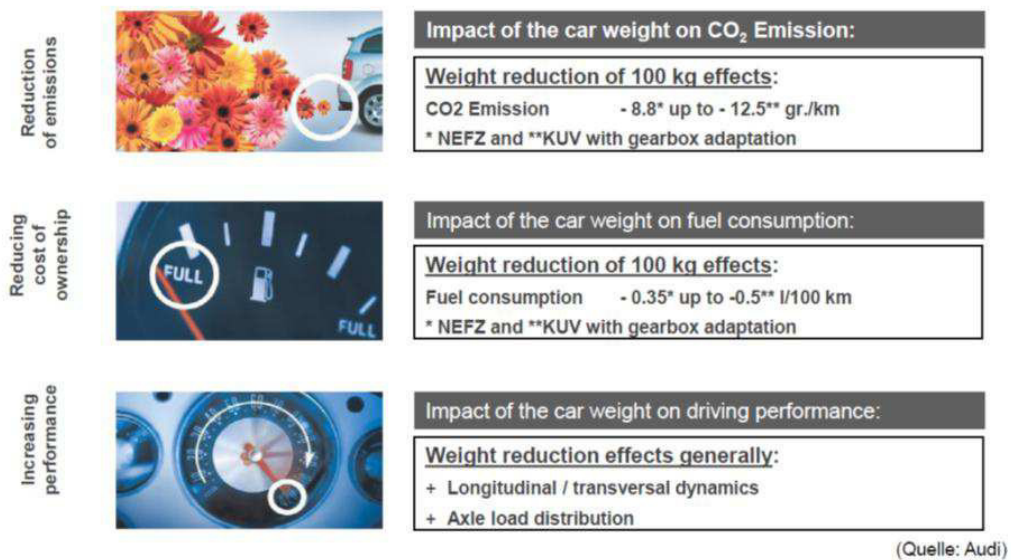


Abbildung 3: Bedeutung des Leichtbaus im Fahrzeugbau⁶

⁵ Quelle: Drechsler, Klaus (2012), S.4

⁶ Quelle: Drechsler, Klaus (2012), S.8

Durch rechtliche Bestimmungen müssen europäische Autohersteller die durchschnittliche CO₂-Emission ihrer Fahrzeugflotte unter den Grenzwert von 95 Gramm pro Kilometer bringen. Dieser Wert entspricht in etwa einem Durchschnittsverbrauch von 3,6 Liter Diesel oder 4,1 Liter Benzin.⁷

Einige Umweltorganisationen fordern sogar einen noch strengeren Grenzwert von 80 Gramm pro Kilometer.

Diese Gesetzesänderung wirkt sich zwar positiv auf die Umwelt und die Treibstoffkosten der Fahrzeughalter aus, aber den Automobilherstellern drohen harte Strafen bei Nichteinhaltung der geforderten Grenzwerte.

„Der einzige Ausweg: Kleinere Motoren, alternative Antriebe – und vor allem leichtere Fahrzeuge“⁸

⁷ Vgl. Internet-Artikel Rees, Jürgen (2013)

⁸ Zitat: Internet-Artikel Rees, Jürgen (2013)

3 Leichtbauwerkstoffe

Im folgenden Kapitel soll ein Einblick, über im Leichtbau verwendete Werkstoffe, gegeben werden. Der Vergleich der spezifischen Festigkeiten und spezifischen Steifigkeiten soll einen Überblick über das Leichtbaupotential der einzelnen Werkstoffe geben. Tabellen mit Festigkeitswerten für die einzelnen Werkstoffe sind den Anlagen beigefügt.

3.1 Stahl

Stahl zählt derzeit zu den am häufigsten verwendeten Werkstoffen, ob im Fahrzeugbau, Maschinenbau oder Anlagenbau. Gründe dafür sind die einfache Verarbeitung, Bearbeitung und Fügetechnik.

	Durchschnitt der Referenz- fahrzeuge	ULSAB- Ergebnisse	
Karosseriege- wicht (kg)	271	203	-25 %
Statische Tor- sionssteifigkeit (Nm/Grad)	11.531	20.800	+80 %
Statische Biegesteifigkeit (N/mm)	11.902	18.100	+52 %
1. Karosserie- Eigenfrequenz (Hz)	38	60	+58 %

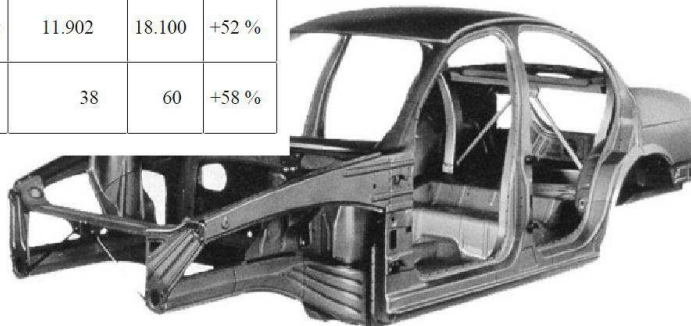


Abbildung 4: Stahlkarosserie Ultra-Light Steel Auto Body (ULSAB)⁹

Durch die Modifikation der Werkstoffeigenschaften über Legieren, Wärmebehandlungen oder Beschichtungen, können eine große Vielfalt an gewünschten Effekten erzielt werden. Der hohen Dichte steht ein günstiger Kilopreis entgegen.

⁹ Quelle: Klein, Bernd (2011), S.38

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 7,85$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 210000$
Schubmodul in MPa	$G = 80000$
Querkontraktion	$\nu = 0,3$
Zugfestigkeit in MPa	$R_m = 300-1450$
Streckgrenze in MPa	$R_{p0,2} = 180-900$

Tabelle 1: Materialeigenschaften Stahl

3.2 Aluminium

Aluminium ist eines der bekanntesten Leichtbaumetalle. Ähnlich wie bei Stählen, steht auch hier eine umfassende Palette an Möglichkeiten zur Modifikation der Werkstoffeigenschaften zur Verfügung. Legieren, Aushärten und eine Festigkeitserhöhung durch Aushärten, die an die Festigkeitswerte von Stählen heranreicht, ist möglich. Durch die niedrige Dichte, hohe Festigkeit und eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit bietet sich Aluminium für einen Einsatz im Leichtbau an.



Abbildung 5: Aluminiumkarosserie Jaguar XJ¹⁰

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 2,70$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 70000$
Schubmodul in MPa	$G = 26000$
Querkontraktion	$\nu = 0,34$
Zugfestigkeit in MPa	$R_m = 75-550$
Streckgrenze in MPa	$R_{p0,2} = 20-450$

Tabelle 2: Materialeigenschaften Aluminium

¹⁰ Quelle: Internet-Artikel Paschek, Laurin (2013)

3.3 Magnesium

Aufgrund der hervorragenden Werte, in Bezug auf Dauerfestigkeit, werden Magnesiumlegierungen bevorzugt bei dynamisch beanspruchten Bauteilen, wie Getriebegehäuse, eingesetzt.¹¹



Abbildung 6: Autotür aus Magnesium¹²

Die niedrige Korrosionsbeständigkeit, verminderte Schweißbarkeit und komplizierte Bearbeitung haben aber, trotz sehr niedriger Dichte, nur zu einem begrenzten Anwendungsfeld im Leichtbau geführt.

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 1,74$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 45000$
Schubmodul in MPa	$G = 17700$
Querkontraktion	$\nu = 0,27$
Zugfestigkeit in MPa	$R_m = 150-300$
Streckgrenze in MPa	$R_{p0,2} = 100-200$

Tabelle 3: Materialeigenschaften Magnesium

¹¹ Vgl. Klein, Bernd (2011), S.50

¹² Quelle: Internet-Artikel Brünglinghaus, Christiane (2013)

3.4 Titan

Niedrige Dichte, Festigkeitswerte, die größer als die von hochfesten Stählen sind und eine hohe Korrosionsbeständigkeit machen Titan zu einem der geeignetsten Werkstoffe im Leichtbau.



Abbildung 7: Titanabgasanlage¹³

Durch die hohe Festigkeit sind Titanlegierungen aber nur mehr sehr schwierig zu bearbeiten und die Schweißbarkeit ist nur mehr eingeschränkt gegeben.¹⁴

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 4,50$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 110000$
Schubmodul in MPa	$G = 40400$
Querkontraktion	$\nu = 0,36$
Zugfestigkeit in MPa	$R_m = 300-1800$
Streckgrenze in MPa	$R_{p0,2} = 200-1700$

Tabelle 4: Materialeigenschaften Titan

¹³ Quelle: Internet-Artikel Monse, Philipp (2013)

¹⁴ Vgl. Klein, Bernd (2011), S.52

3.5 Faserverstärkte Metalle

Mit der Zielsetzung erhöhter Hitzebeständigkeit, im Vergleich zu Faser-Kunststoff-Verbunden, werden auch die mit Leichtmetall-Matrix verbundenen Fasern ihr Anwendungsgebiet im Leichtbau finden.

3.6 Faser-Kunststoff-Verbunde

Ein Faserverbundwerkstoff ist immer eine Kombination aus mindestens 2 Werkstoffen, der Faser und der Matrix. Innerhalb des Faser-Kunststoff-Verbundes werden mechanische Belastungen von der, in der Matrix eingebetteten, Faser übernommen.

Aus diesen Kombinationen können Eigenschaften erzielt werden, die die einzelnen Werkstoffe nicht aufweisen können. Hohe Festigkeit und hohe Steifigkeit bei niedriger Dichte, eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und die Möglichkeit des elektrischen Leiters oder Isolators, sind nur einige davon.

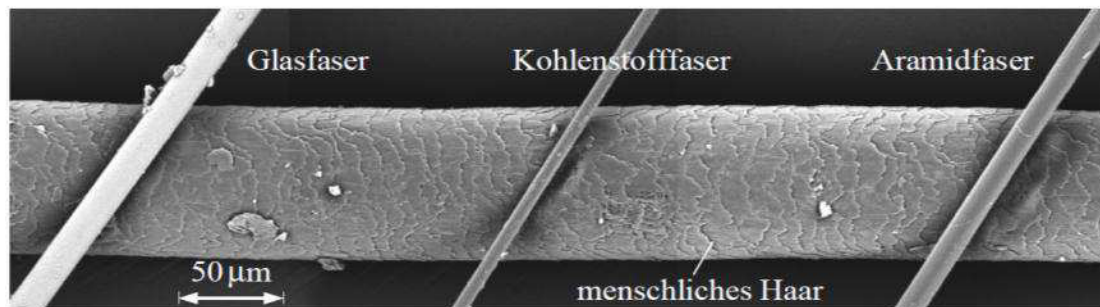


Abbildung 8: Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahme der gebräuchlichen Verstärkungsfasern¹⁵

¹⁵ Quelle: Schürmann, Helmut (2007), S.22

3.6.1 Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)

Die Herstellung von Glasfasern erfolgt zu einem großen Teil über das Schmelzspinnverfahren, bei dem flüssiges Glas in Fäden gezogen und dann zu einem Faden versponnen wird. Dabei ist darauf zu achten, dass nicht bereits beim Herstellungsprozess Schäden an den empfindlichen Fasern verursacht werden.¹⁶

Als besonderes Merkmal für den Einsatz im Automobilleichtbau kann die absolute Unbrennbarkeit und die, bereits in der Herstellung zu berücksichtigende Einfärbung der Glasfasern, genannt werden. Des Weiteren können Schäden am *Laminat*¹⁷ bereits optisch erkannt werden. Diese Möglichkeit bietet sich bei CFK kaum.

Das beinahe ideal-elastische Materialverhalten und der niedrige Elastizitätsmodul sind für einen Großteil der Strukturanwendungen nicht akzeptabel. Bei Federelementen sind diese Eigenschaften aber erwünscht und GFK wird bereits in der Serienfertigung dieser Bauteile eingesetzt.¹⁸

Wie die Aramidfaser ist auch die Glasfaser ein ausgezeichneter elektrischer und auch thermischer Isolator. Da die Festigkeit der Glasfaser auch sehr stark temperaturabhängig ist, wurden für die Anwendungsgebiete mit erhöhten Temperaturen spezielle Faservarianten entwickelt.



Abbildung 9: Glasfaser in Epoxidharz-Matrix¹⁹

¹⁶ Vgl. Schürmann, Helmut (2007), S.27 f

¹⁷ Begriffserklärung Laminat: Schichtweise aufgebauter Werkstoff

¹⁸ Vgl. Schürmann, Helmut (2007), S.29

¹⁹ Quelle: Schürmann, Helmut (2007), S.34

Im Vergleich zu den anderen Verstärkungsfasern ist die Glasfaser mit Abstand die billigste.

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 2,54$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 73000$ (längs)
Zugfestigkeit in MPa	$R_{zB} = 3000$

Tabelle 5: Materialeigenschaften Glasfaser

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 2,20$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 40000$ (längs)
Zugfestigkeit in MPa	$R_{zB} = 800$

Tabelle 6: Materialeigenschaften GFK

3.6.2 Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK)

Die Kohlenstofffasern sind unter den Verstärkungsfasern die Fasern mit den besten mechanischen Eigenschaften. Die hohe Festigkeit und der Elastizitätsmodul sind, bezogen auf die geringe Dichte, hervorragend.

Für die Herstellung von Kohlenstofffasern sind derzeit zwei Verfahren gebräuchlich. Wobei die Weiterverarbeitung von Polyacrylnitril (PAN), im Vergleich zur Weiterverarbeitung von Petroleumpech, den größten Marktanteil besitzt.²⁰

Die Kohlenstofffasern zeichnen sich nicht nur durch ihre Festigkeitswerte aus. Aufgrund ihres elementaren Aufbaues lassen sich auch thermische Ausdehnungen, zumindest in eine Richtung, komplett reduzieren.²¹ Die Materialkennwerte, in Bezug auf Ermüdungsfestigkeit, bieten auch die Möglichkeit eines Langzeiteinsatzes. Damit sind Kohlenstofffasern auch in der Flugzeugindustrie sehr beliebt.

²⁰ Vgl. Schürmann, Helmut (2007), S.36

²¹ Vgl. Schürmann, Helmut (2007), S.40

Schädigungen sind in dem undurchsichtigen Faser-Kunststoff-Verbund fast nicht zu erkennen. In Kombination mit dem Bruchverhalten kann das im schlimmsten Fall zu einem plötzlichen Versagen, ohne Anzeichen von Vorschädigung, führen.

Ein großer Vorteil von Kohlenstofffasern ist die Temperaturbeständigkeit, mit der die Kohlenstofffaser gegenüber der Glasfaser und der Aramidfaser, auch bei erhöhten Temperaturen, eingesetzt werden kann. Im Gegensatz zu anderen Verstärkungsfasern sind Kohlenstofffasern exzellente elektrische Leiter.²²

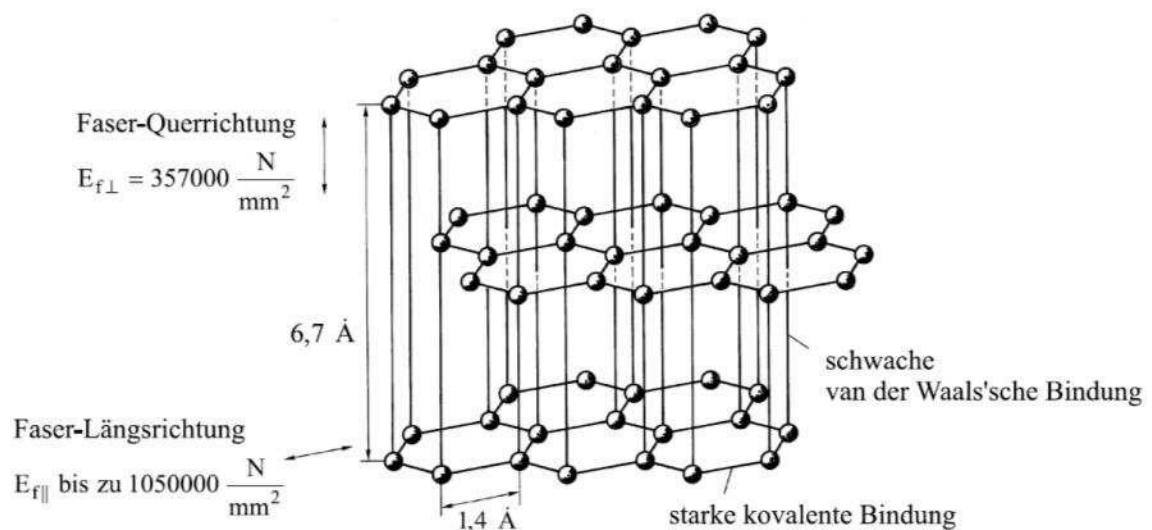


Abbildung 10: Elementarzelle des Graphitkristalls²³

Als größter Nachteil kann derzeit noch der sehr teure Faserpreis angeführt werden. Im Vergleich zu Standard-Rovings²⁴ von 1 K bis 24 K werden aber bereits kostengünstigere Varianten bis zu 400 K Rovings (400.000 Filamente²⁵) angeboten.

²² Vgl. Schürmann, Helmut (2007), S.42

²³ Quelle: Schürmann, Helmut (2007), S.38

²⁴ Begriffserklärung Roving: Bündel parallel angeordneter Endlosfasern

²⁵ Begriffserklärung Filament: Endlosfaser

	HT-Typ	HM-Typ
Dichte in kg/dm ³	$\rho = 1,78$	$\rho = 1,97$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 235000$ (längs)	$E = 358000$ (längs)
Zugfestigkeit in MPa	$R_{zB} = 3400$	$R_{zB} = 2350$

Tabelle 7: Materialeigenschaften Kohlenstofffaser

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 1,50$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 120000$ (längs)
Zugfestigkeit in MPa	$R_{zB} = 1700$

Tabelle 8: Materialeigenschaften CFK

3.6.3 Aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK)

Die Aramidfaser oder auch besser bekannt unter ihrem Handelsnamen *Kevlar* wird im flüssig-kristallinen Zustand versponnen und anschließend bei erhöhten Temperaturen gereckt. Um eine gute Haftung zwischen Fasern und Epoxidharzen zu erzielen, werden die Fasern nach Beendigung des Herstellungsprozesses imprägniert.²⁶

Diesem Herstellungsprozess sind hohe Festigkeiten und ein hoher Elastizitätsmodul zu verdanken.

Die Aramidfaser bietet ausgezeichnete Ermüdungsfestigkeitswerte und liegt mit ihrer Dichte unter denen der Glasfaser und Kohlenstofffaser. Die Festigkeitswerte der Aramidfaser übersteigen die der Glasfaser und weisen einen fast doppelt so hohen Elastizitätsmodul auf.

Aufgrund ihrer sehr hohen Zähigkeit werden Aramidfasern auch als Rissstopper in anderen *Laminaten*²⁷ eingesetzt.²⁸ Diese Widerstandsfähigkeit prädestiniert die Aramidfaser auch für die Verwendung in Splitterschutzwesten, kugelsicheren Westen und Helmen.

Diese hohe Zähigkeit stellt sich aber zumindest bei der Bearbeitung als Nachteil heraus. Faser-Kunststoff-Verbunde aus Aramidfaser sind nachträglich fast gar nicht oder wenn, dann nur mit Spezialwerkzeug zu bearbeiten. Durch die fehlende UV-Beständigkeit muss

²⁶ Vgl. Schürmann, Helmut (2007), S.43

²⁷ Begriffserklärung Laminat: Schichtweise aufgebauter Werkstoff

²⁸ Vgl. Schürmann, Helmut (2007), S.44

auch in der Lagerung der Faser darauf geachtet werden, dass sich durch mangelnde Lagerung die Festigkeit nicht reduziert.²⁹

Aramidfasern sind großartige elektrische Isolatoren. Ihre mechanischen Eigenschaften sind aber sehr stark temperaturabhängig und verlieren bereits ab Zimmertemperatur konstant an Festigkeit und Steifigkeit.

Preislich liegt die Aramidfaser zwischen den Glasfasern und den Kohlenstofffasern.

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 1,44$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 60000$ (längs)
Zugfestigkeit in MPa	$R_{zB} = 2800$

Tabelle 9: Materialeigenschaften Aramidfaser

Dichte in kg/dm ³	$\rho = 1,33$
Elastizitätsmodul in MPa	$E = 30000$ (längs)
Zugfestigkeit in MPa	$R_{zB} = 1200$

Tabelle 10: Materialeigenschaften AFK

²⁹ Vgl. Schürmann, Helmut (2007), S.45

3.7 Spezifische Festigkeit und Steifigkeit

Alle in diesem Kapitel angeführten Werkstoffe haben ihre Berechtigung im Automobilen Leichtbau. Sei es wegen der guten Korrosionsbeständigkeit, guter und einfacher Verbindungstechniken oder wegen der geringen Dichte. Um bis 2020 die gesetzlichen Vorlagen im Bereich der CO₂-Emissionen auch einhalten zu können, werden Autobauer aber gezwungen sein, besonders schnell, besonders leicht zu bauen.³⁰

Hohe Festigkeit und hohe Steifigkeit bei gleichzeitig sehr niedriger Dichte sind Voraussetzungen für einen idealen Leichtbauwerkstoff. Zu diesem Zweck werden die Werkstoffe über ihre spezifische Festigkeit und spezifische Steifigkeit miteinander verglichen, um herauszufinden welcher Werkstoff das größte Potential für den Leichtbau aufweist.

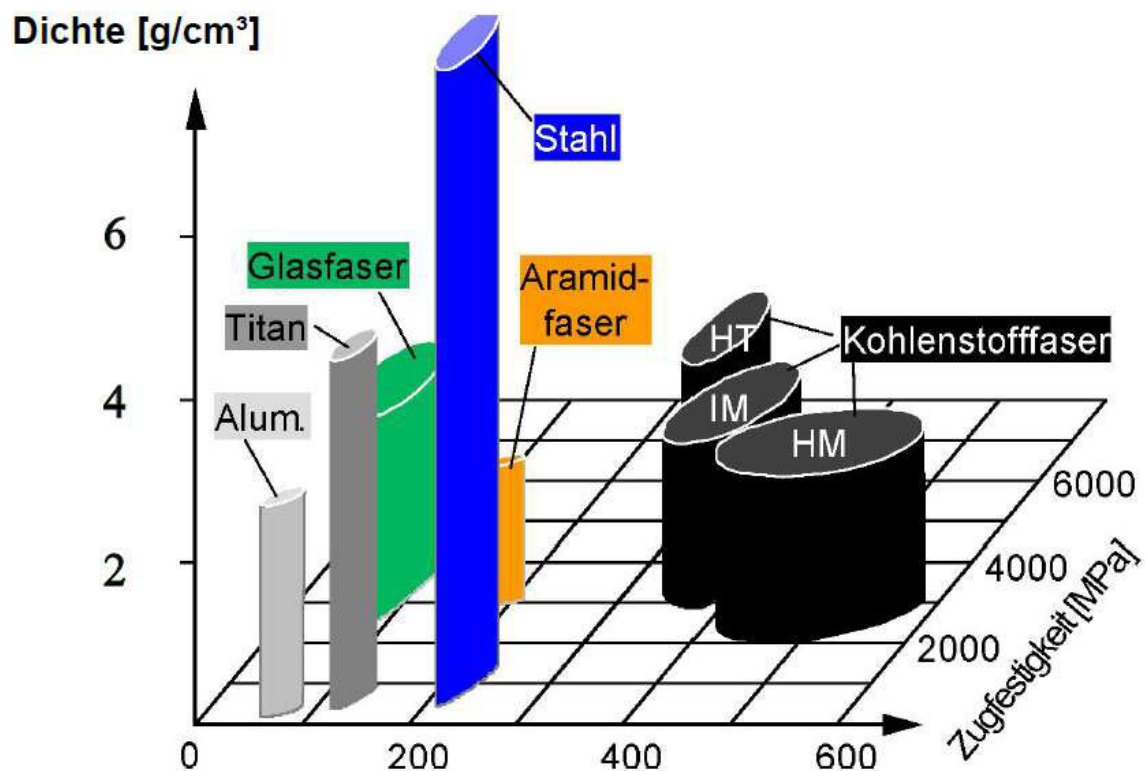


Abbildung 11: Spezifische Festigkeit u. Steifigkeit von Metallen und Faser-Kunststoff-Verbunden³¹

³⁰ Vgl. Internet-Artikel Rees, Jürgen (2013)

³¹ Quelle: Scheitle, Johann P. (2012), S.11

Die spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten zeigen deutlich, dass Faser-Kunststoff-Verbunde aus CFK derzeit das meiste Potential für drastische Gewichtsreduzierungen aufweisen. Um diese Werte aber tatsächlich zu erreichen, dürfen nur Fertigungsverfahren mit hohem Faseranteil und der Verwendung von Langfasern oder Endlosfasern eingesetzt werden.

4 Herstellungsverfahren von FKV

Im folgenden Kapitel wird ein kurzer Überblick über die derzeit üblichen Herstellungsverfahren für Faser-Kunststoff-Verbunde gegeben.

4.1 Handlaminieren/Faserspritzen

Das Handlaminieren ist die früheste Form der Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden. Hier wird stufenweise, über Einlegen von Geweben oder Matten, der gewünschte Lagenaufbau erzielt. Mittels Handrollen wird nach jeder Lage eine Verdichtung und Entlüftung des Matrix-Faserverbundes durchgeführt.³²

Das Faserspritzverfahren stellt eine Weiterentwicklung des Handlaminierens dar. Bei diesem Verfahren werden bereits geschnittene Fasern, gemeinsam mit dem Matrix-Werkstoff, über das Spritzwerkzeug in die Form eingebracht. Das Entlüften ist aber weiterhin mit einem enormen personellen Aufwand verbunden.



Abbildung 12: Faserspritzen eines Wohnmobildachs³³

³² Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.311

³³ Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.326

Aufgrund der hervorragenden Laminatqualität bietet sich das Handlaminieren/Faserspritzen bevorzugt für den Prototypenbau oder Einzelanfertigungen an.

Der hohe Personalaufwand und die langen Fertigungszeiten machen dieses Verfahren aber für die Großserienfertigung unbrauchbar. Die damit verbundenen Kosten und die sich aus der Handarbeit ergebenden Qualitätsstreuungen sind im automobilen Leichtbau nicht tragbar.

4.2 Nasspressen

Beim Nasspressen werden die Verstärkungsfasern in eine zweiteilige Form gelegt und beim Schließen der Presse mit dem flüssigen Matrixwerkstoff getränkt. Durch die Presskraft verteilt sich der noch flüssige Matrixwerkstoff und sorgt für eine gleichmäßige Benetzung aller Fasern. Nach dem Aushärtvorgang kann das fertige Bauteil der Form entnommen werden. Durch Erwärmen der Form kann eine deutliche Verkürzung der Aushärtezeit realisiert werden. Taktzeiten von einigen Minuten sind daher möglich.³⁴



Abbildung 13: Hydraulische Oberkolben-Schiebetisch Presse³⁵

³⁴ Vgl. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.331 ff

³⁵ Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.333

Der sehr große Faseranteil und der hohe Automatisierungsgrad würden für einen Einsatz in der automobilen Großserie sprechen. Unter Verwendung von geeigneten Vorrichtungen, zum Zuschneiden und Entformen, können Personalkosten drastisch reduziert werden.

4.3 Wickelverfahren

Beim Wickelverfahren werden, bereits in Harz getränkte, Fasern um einen Kern gewickelt. Dieser Kern ist vorzugsweise rotationssymmetrisch und ohne Hinterschnitt. Dies hat den Vorteil, dass man den Kern später auch wieder entfernen kann.



Abbildung 14: Ringfadenauge³⁶

Es können jedoch auch komplexe Strukturen sogar mit Hinterschnitt gewickelt werden. In diesem Fall müssen ausschmelzbare Kerne verwendet werden, oder der Kern verbleibt im Bauteil. Letztere Variante kann unter Umständen auch für einige Anwendungsgebiete gewünscht sein.³⁷

Die mechanischen Eigenschaften lassen sich über den Wickelwinkel und Wickelart maßgeblich bestimmen.

³⁶ Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.360

³⁷ Vgl. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.346

Der geringe Investitionsaufwand und der hohe Automatisierungsgrad, gepaart mit kurzen Taktzeiten, sprechen für einen vermehrten Einsatz im Automobilbau.

4.4 Pultrusion

Beim Profilziehverfahren oder Pultrusions-Verfahren werden Verstärkungsfasern durch ein Harzbad und anschließend durch das Formwerkzeug gezogen. Dabei muss auf eine rasche Aushärtung der Matrix geachtet werden, um die Formstabilität der unzähligen Formgebungsmöglichkeiten zu erhalten. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit mit *Prepregs*³⁸ zu arbeiten. In diesem Fall entfällt das Harzbad und wird durch eine beheizte Form ersetzt, um das Harz zu verflüssigen.³⁹

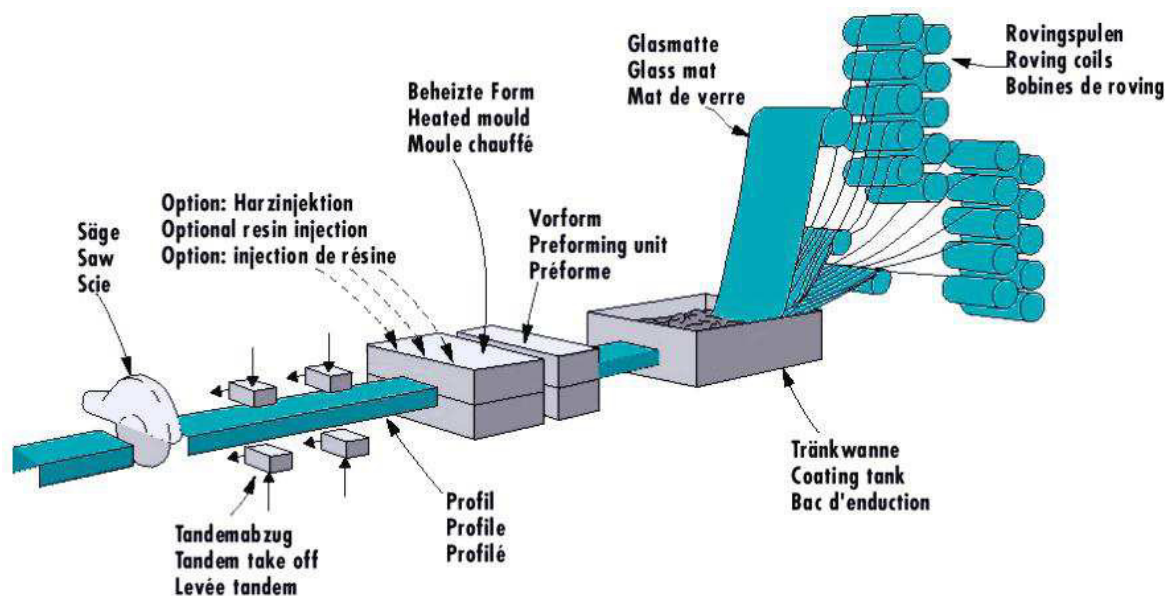


Abbildung 15: Horizontal Pultrusions-Verfahren⁴⁰

Aufgrund des automatisierbaren Herstellungsprozesses und der damit geringen Personalkosten ist das Pultrusions-Verfahren für die Großserienfertigung geeignet. Kurze Taktzeiten und gleichbleibende Erzeugnis-Qualität können ebenfalls realisiert werden.

4.5 Injektionsverfahren

Das Resin Transfer Moulding (RTM) Verfahren ist eines der bekanntesten Herstellverfahren für Faser-Kunststoff-Verbunde. Bei diesem Verfahren werden noch

³⁸ Begriffserklärung Prepreg: Halbzeug aus vorimprägnierten Fasern

³⁹ Vgl. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.362

⁴⁰ Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.364

unbenetzte Halbzeuge in die Form gelegt, die danach geschlossen wird, und in der mittels Vakuumpumpen ein Unterdruck erzeugt wird. Der Matrixwerkstoff wird danach in die Form gepresst und über Kühlsysteme ausgehärtet.

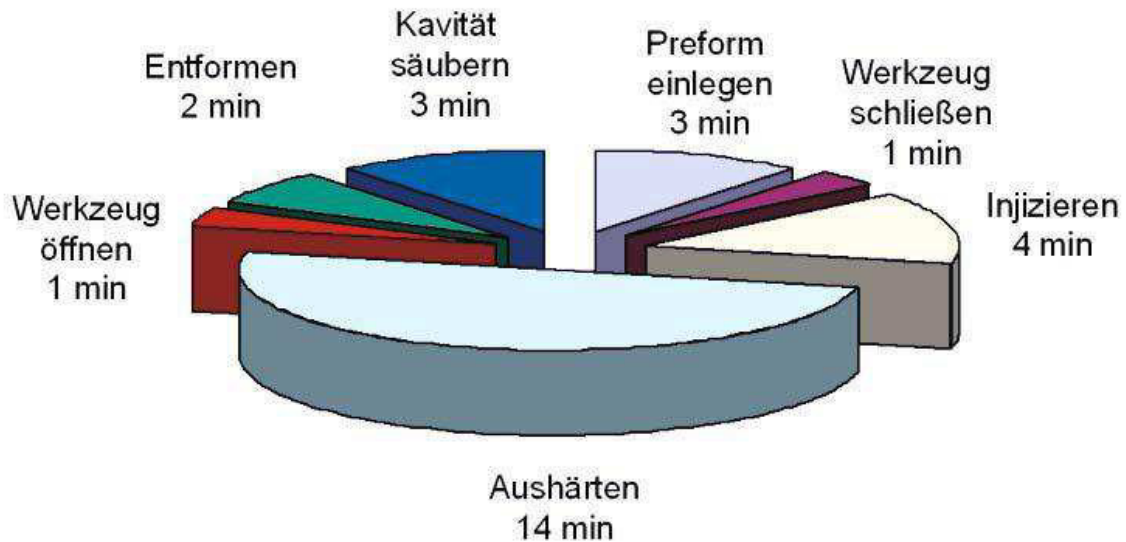


Abbildung 16: Qualitativer Verlauf eines RTM-Zyklus ⁴¹

Mit diesem Verfahren lassen sich kostengünstige und komplexe Bauteile mit einer geringen Nacharbeitsquote erzeugen. Ein großer Vorteil ist auch, dass Metalleinlagen zur späteren Verbindungstechnik bereits mitverarbeitet werden können. Es lassen sich sehr hohe Faseranteile und damit auch gute mechanische Eigenschaften erzielen.

4.6 Automatisierte Legeverfahren

Mit diesem Verfahren können sehr große schalenförmige Strukturen mittels CNC-gesteuerter Roboterablage erzeugt werden. Aufgrund der steuerbaren Faserausrichtung der eingelegten Halbzeuge können sehr gute mechanische Eigenschaften erzielt werden, die sonst nur bei Wickelverfahren oder dem teuren Handlaminieren erreicht werden.⁴²

⁴¹ Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.378

⁴² Vgl. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.484 ff

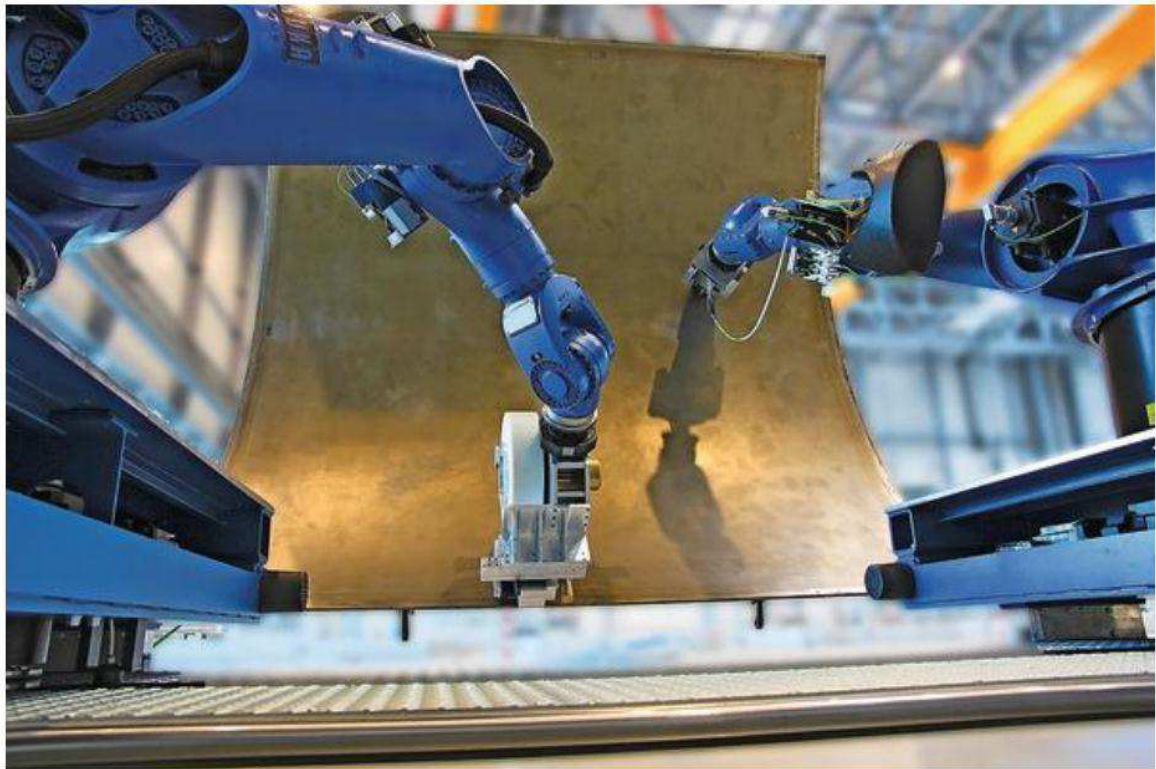


Abbildung 17: CNC-gesteuerte Roboterablage⁴³

Das automatisierte Legeverfahren hat sich in der Flugzeugindustrie bereits erfolgreich durchgesetzt. Eine Großserienfertigung ist aber wegen der nachgeschalteten Prozesse noch nicht möglich.

4.7 Langfaserinjektionsverfahren (LFI)

Bei diesem Spritzverfahren werden Fasern auf die gewünschte Länge gekürzt und beim Einspritzen in die Form bereits mit dem Harz getränkt. Das Einspritzen erfolgt dabei automatisch über CNC-gesteuerte Robotersysteme. Nach dem belastungsgerechten Aufbringen, bei dem auch unterschiedliche Dicken realisiert werden können, wird die Form geschlossen und der Aushärteprozess unter Wärmeeinbringung beginnt.⁴⁴

⁴³ Quelle: Internet-Artikel Jäckl, Joachim (2013)

⁴⁴ Vgl. AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.487 ff



Abbildung 18: CNC-gesteuerter Roboterspritzkopf⁴⁵

Dieses Verfahren wird bereits in Großserien verwendet. Gleichbleibende Qualität, die Möglichkeit damit eine komplexe Geometrie zu fertigen, kurze Taktzeiten und die Möglichkeit der Farbeinbringung in den Fertigungsprozess, machen diese Technologie für die Automobilindustrie interessant.

4.8 Hochdruckpressen von GMT / LFT

Beim Hochdruckpressen von glasfaserverstärkten Thermoplasten (GMT) und langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) ergeben sich durch die Ablage in der Pressenform bessere mechanische Eigenschaften als beim Spritzgießen. Durch die hohen Schließgeschwindigkeiten der Presse ergeben sich grobe Bauteiloberflächen. Um einen gleichmäßigen Faseranteil zu gewährleisten ist die Schließgeschwindigkeit aber ein fixer Prozessparameter.

⁴⁵ Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.400



Abbildung 19: Anwendungen im Automobilbereich⁴⁶

4.9 Heißpressen von SMC / BMC

Dieses Verfahren wird bereits erfolgreich in der Automobilindustrie, zur Herstellung von nichttragenden Karosserieteilen verwendet. In Taktzeiten unter einer Minute können bereits lackierte Außenteile erzeugt werden.



Abbildung 20: Werkzeug mit Vakuumpresstechnik⁴⁷

⁴⁶ Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.428

⁴⁷ Quelle: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) (2010), S.400

Beim Heißpressen von Sheet Moulding Compound (SMC) und Bulk Moulding Compound (BMC) wird die teigige Masse in die Form gebracht und später unter Druck verpresst. Um eine möglichst gute Oberflächengüte zu erreichen wird während des Pressvorganges ein Unterdruck erzeugt.

4.10 Spritzgießen von BMC

Aufgrund der hohen Automatisierbarkeit und der kurzen Taktzeiten wird dieses Verfahren bereits seit einigen Jahren in der Automobilindustrie eingesetzt.

Der Bulk Moulding Compound (BMC) wird unter Druck in die Form gepresst. Dabei lässt sich aber nur schwer eine Faservorzugsrichtung definieren und die Festigkeitswerte unterliegen einer gewissen Streuung.

5 Der globale CFK-Markt

5.1 Der Kohlenstofffasermarkt

Die gesamte Weltkapazität von derzeit etwa 90.000 t Kohlenstofffasern⁴⁸, verteilt sich zu gleichen Anteilen auf die USA, Europa, Japan und den Rest der Welt.

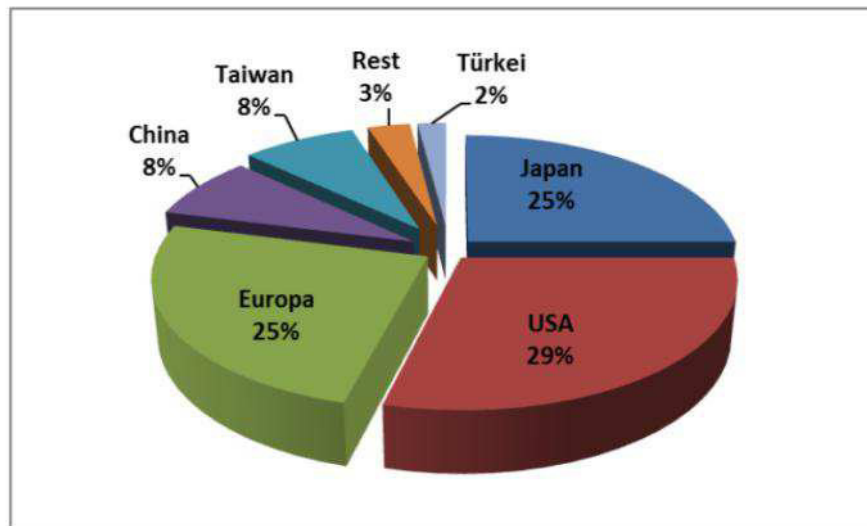


Abbildung 21: CF-Kapazität / Aufteilung nach Regionen (2011)⁴⁹

Der Bedarf an Kohlenstofffasern ist in den letzten Jahren, mit Ausnahme der Finanzkrise 2009, kontinuierlich gestiegen. Der tatsächliche Bedarf an Kohlenstofffasern hat in den letzten Jahren die Prognosen immer übertroffen, darum wird für 2020 ein optimistisch geschätzter Bedarf von 130.000 t angenommen. Diese Prognosen werden aber durch geplante Kapazitätserweiterungen, der Kohlenstofffasern produzierenden Unternehmen, untermauert.⁵⁰

⁴⁸ Vgl. Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.6

⁴⁹ Quelle: Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.6

⁵⁰ Vgl. Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.4

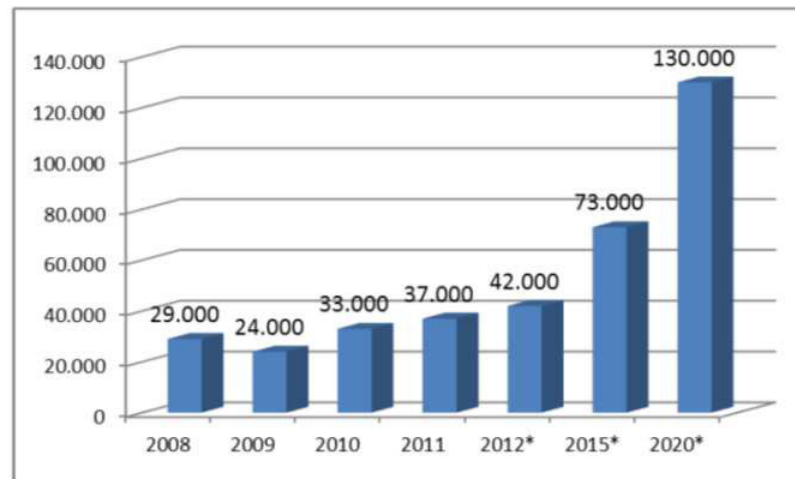


Abbildung 22: Globaler Bedarf von Kohlenstofffasern in Tonnen 2008-2020 (*Schätzung)⁵¹

5.2 Der CFK-Markt

Der CFK-Markt entwickelt sich parallel zum Kohlenstofffasermarkt, da in etwa 95% der Kohlenstofffasern auch zu CFK weiterverarbeitet werden. Nur ein verschwindend geringer Anteil der Kohlenstofffasern findet sich in anderen Anwendungsfällen wieder. Unter der Berücksichtigung, der im CFK enthaltenen Matrixwerkstoffe, fällt der Bedarf an CFK deutlich höher aus.⁵²

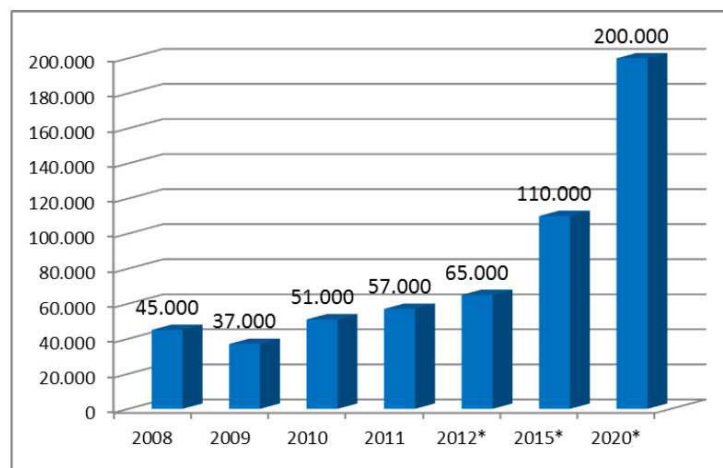


Abbildung 23: Globaler CFK-Bedarf in Tonnen 2008-2020 (*Schätzungen)⁵³

⁵¹ Quelle: Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.4

⁵² Vgl. Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.7

⁵³ Quelle: Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.7

Die Aufteilung der Herstellverfahren zeigt, dass derzeit ca. 30% der CFK-Halbzeuge in Produktionsverfahren mit gutem Potential für die Serienfertigung hergestellt werden. Flechtverfahren, Wickelverfahren und der Pultrusions-Prozess sind größtenteils automatisierbar und arbeiten unter der Verwendung von Endlosfasern. 18% der Kohlenstofffasern, die zu Kurzschnitt verarbeitet werden, spielen im automobilen Leichtbau nur eine untergeordnete Rolle zur Erzeugung von tragenden Strukturbauteilen, da für eine maximale Gewichtseinsparung die Festigkeitswerte nicht erreicht werden. Mehr als 50% werden zu *Prepregs*⁵⁴ verarbeitet, wo bereits an der vollautomatischen Gelege-Ablage gearbeitet wird.

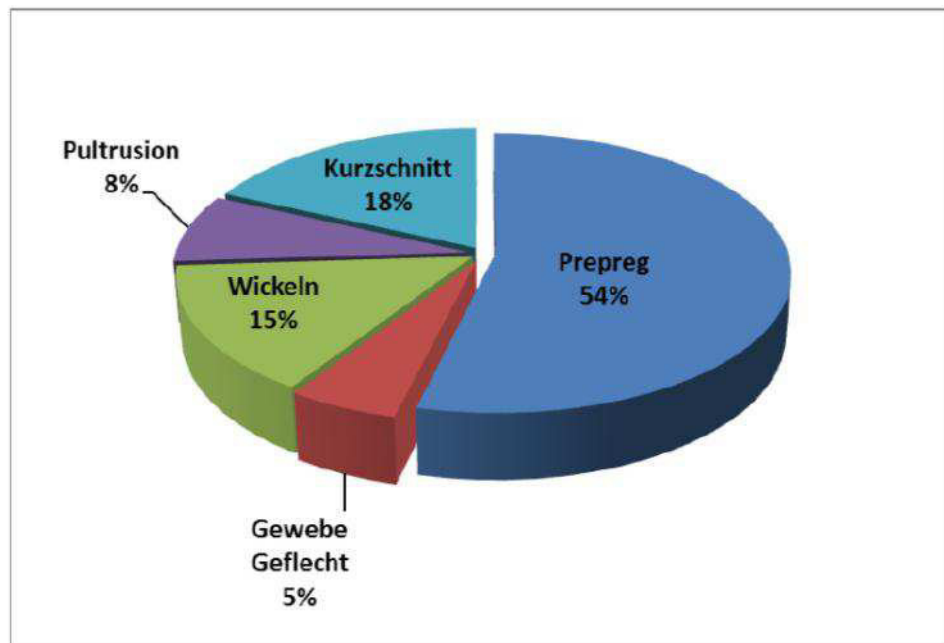


Abbildung 24: Aufteilung der Herstellverfahren / Halbzeuge für CFK (2011)⁵⁵

Sieht man sich den globalen Verbrauch von CFK nach Anwendungsgebieten an, entfällt ein Viertel auf die Produktion von Rotorblättern für den Einsatz an Windkraftanlagen. Interessant ist auch, dass für Sport und Freizeitartikel beinahe die gleiche Menge an CFK verbraucht wird, wie in der Flugzeugindustrie verarbeitet wird.

⁵⁴ Begriffserklärung Prepreg: Halbzeug aus vorimprägnierten Fasern

⁵⁵ Quelle: Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.8

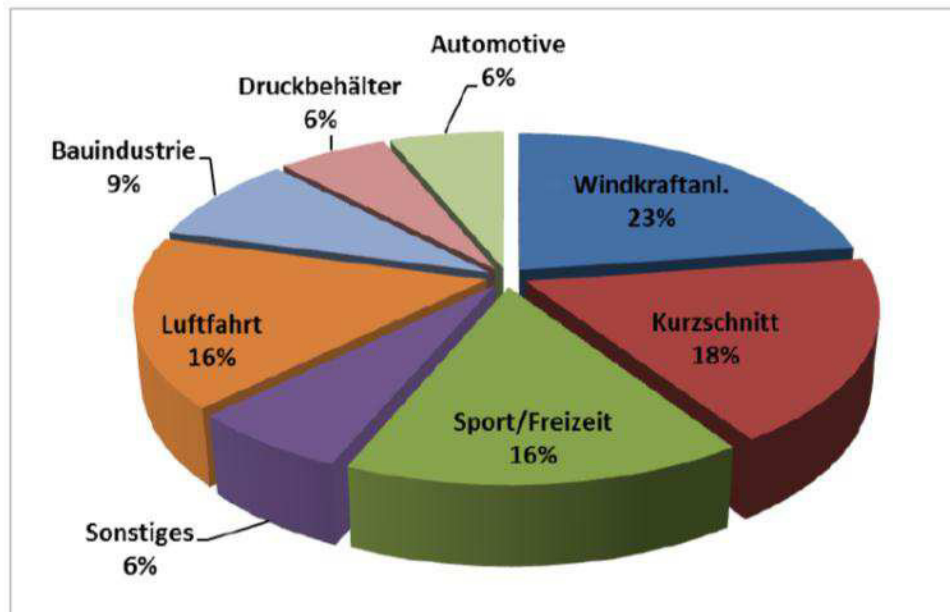


Abbildung 25: Globaler CFK-Verbrauch nach Anwendungen (2011)⁵⁶

Der geringe Anteil von etwa 6% für automobiler Anwendungen wird in den nächsten Jahren, durch verbesserte Verarbeitungsmöglichkeiten, und den gesetzlichen Bestimmungen zur Schadstoffreduzierung, aber sicher steigen.⁵⁷

5.3 Ausblick – Kohlenstofffaserverbrauch in der Automobilindustrie

Während man am globalen CFK-Markt von einem jährlichen Wachstum von 13% ausgeht, wird für den Verbrauch in der Automobilindustrie sogar mit einem jährlichen Verbrauch von 15% oder mehr gerechnet. Durch Kostensenkungen in der Herstellung von CFK-Bauteilen könnten bis 2030 ca. 75% der Kohlenstofffasern für den Fahrzeugbau benötigt werden. Die dazu notwendigen großserientauglichen Produktionsverfahren zu entwickeln, ist auch das Ziel vieler Kooperationen zwischen Autoherstellern und Kohlenstofffaserproduzenten.⁵⁸

⁵⁶ Quelle: Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.10

⁵⁷ Vgl. Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.11

⁵⁸ Vgl. Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.16

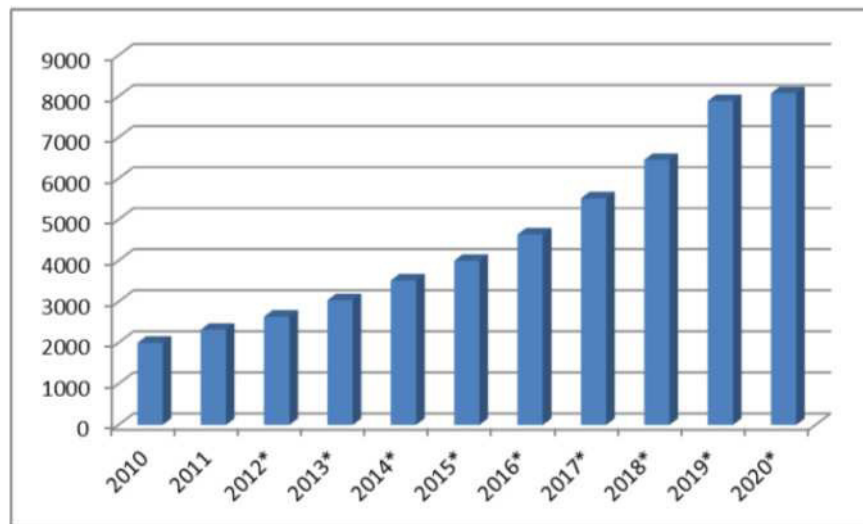


Abbildung 26: CF-Verbrauch im Automobilbau in Tonnen (*Schätzungen)⁵⁹

⁵⁹ Quelle: Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.13

6 Grundsätzliches zur Kostenrechnung

6.1 Aufgaben der Kostenrechnung

Einen wesentlichen Bereich des Controllings bildet die Kostenrechnung. Ihre Aufgabe besteht darin, Informationen über die Leistungsfähigkeit des Betriebes bereitzustellen.⁶⁰

Die Hauptaufgaben der Kostenrechnung können wie folgt unterschieden werden⁶¹:

- Wirtschaftlichkeitskontrolle
- Preisfestlegung
- Interne Erfolgsermittlung
- Informationsbereitstellung für betriebliche Entscheidungen

6.2 Konzept der Zuschlagskalkulation

Einzelkosten können den Kostenträgern direkt zugeteilt werden. Gemeinkosten dagegen, können nur indirekt zugeteilt werden. Diese Zuteilung erfolgt in den Zuschlagskalkulationen über sogenannte Zuschlagssätze.

Über die Zuschlagssätze ist es möglich, eine Zuteilung der Gemeinkosten über Multiplikation der Zuschlagssätze mit den Kostenträgereinzelkosten vorzunehmen.⁶²

In der Maschinenstundensatzrechnung werden die Gemeinkosten über die Maßgröße der Maschinenlaufzeit verteilt.⁶³ Durch zunehmende Automatisierung im Fertigungsbereich nimmt die Eignung der Einzelkosten, als Schlüsselgröße zugunsten von Mengenschlüssel, wie z. B. Maschinenstunden, ab.⁶⁴

⁶⁰ Vgl. Jung, Hans (2010), S.1113

⁶¹ Vgl. Jung, Hans (2010), S.1113

⁶² Vgl. Stelling, Johannes N. (2005), S.128

⁶³ Vgl. Stelling, Johannes N. (2005), S.129

⁶⁴ Vgl. Stelling, Johannes N. (2005), S.132

6.3 Begriff-Definitionen

6.3.1 Kostenstelle

Kostenstellen beschreiben den Ort im Unternehmen, bei dem Kosten entstehen und Leistungen erbracht werden. Einige gängige Kostenstellen sind Material, Fertigung und Vertrieb.

6.3.2 Kostenträger

Unter Kostenträger versteht man die Leistungseinheit einer Kostenstelle. Das bedeutet, Produkte eines Unternehmens, denen die Kosten zugerechnet werden. Diese müssen die Kosten bei Verkauf, durch die Erlöse „tragen“.⁶⁵

6.3.3 Einzelkosten

Einzelkosten sind die Kosten, die einem Kostenträger direkt zugeteilt werden können, z. B. der Fertigungslohn und die Rohstoffkosten.

6.3.4 Gemeinkosten

Im Gegensatz zu den Einzelkosten können die Gemeinkosten den Kostenträgern nicht direkt zugeteilt werden. Ein typisches Beispiel sind die Kosten für eine Maschine, die für die Erzeugung unterschiedlicher Produkte verwendet wird.

6.3.5 Materialkosten

Materialkosten setzen sich aus den Kosten für verbrauchtes Material (Rohstoffkosten und den Kosten für Hilfsmaterial) zusammen.

6.3.6 Fertigungskosten

Fertigungskosten beinhalten die in der Produktion eines Unternehmens anfallenden Kosten und setzen sich aus Fertigungseinzelkosten und Fertigungsgemeinkosten zusammen.

⁶⁵ Vgl. Härdler, Jürgen (Hrsg.) (2007), S.435

6.3.7 Herstellkosten

Herstellkosten sind die Gesamtheit aller für die Herstellung eines Produktes angefallenen Kosten. Die Herstellkosten umfassen also Materialkosten und Fertigungskosten.

6.3.8 Selbstkosten

Unter Selbstkosten versteht man alle entstandenen Kosten für einen Kostenträger. Sie bilden somit die Summe der Materialkosten, Fertigungskosten und Kosten aus Verwaltung und Vertrieb.

7 Kostenrechnung einer CFK-Antriebswelle

Im folgenden Kapitel soll ein Einblick über die Kostenstrukturen, bei der Herstellung einer CFK-Antriebswelle, mithilfe der Maschinenstundensatzkalkulation, gegeben werde.

Das Berechnungsbeispiel soll des Weiteren zeigen, welcher Kostenspielraum nur durch die Verwendung unterschiedlicher Rovings, und der damit verbundenen Materialkosten entsteht. Die Verwendung von dickeren Rovings hat auch noch den positiven Nebeneffekt, dass sich dadurch die zu wickelnden Lagen und die Prozesskosten reduzieren.

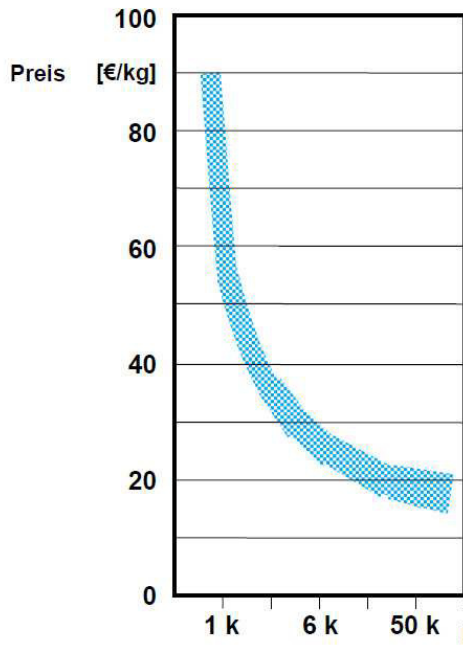
Zu diesem Zweck werden sechs unterschiedliche Antriebswellen, die sicher aber nur durch die verwendeten Rovings, nicht aber durch ihre Geometrie unterscheiden, in der Maschinenstundensatzkalkulation untersucht.

7.1 Eingabedaten

In dieser Berechnung wird von einer Gesamtstückzahl von 27.000 produzierten CFK-Antriebswellen ausgegangen. Diese Anzahl entspricht in etwa den monatlichen KFZ-Neuzulassungen in Österreich.

Die Kosten für Kohlenstofffasern, bei unterschiedlichen Filamentanzahlen pro Roving, wurden der Tabelle 11 entnommen.

Carbonfaser Kosten



Kostentreiber	Aktueller Anteil [%]
PAN Precursor	45
Energie	20
Personal	10
Wartung	8
Chemische Prozesse	8
Sonstiges	9

(Quelle: SGL)

Tabelle 11: Kohlenstofffaserkosten⁶⁶

Transportmaterial, Fertigungslöhne, Fertigungszeiten, Maschinenzeiten und Gemeinkosten sind Schätzwerte, die aber erfahrungsgemäß gut passen. Diese Annahme wird durch den Umstand, dass sich für ein 2kg Bauteil, Herstellkosten von ca. 70 €/kg errechnen, bestätigt.

Die beschriebenen Eingabedaten sind in den folgenden Tabellen 12, 13, 14 und 15 zusammengefasst.

⁶⁶ Quelle: Drechsler, Klaus (2012), S.14

Eingabedaten				
Produkt	1 K Antriebswelle	6 K Antriebswelle	12 K Antriebswelle	
Menge in Stück	4500,00	4500,00	4500,00	
Rohstoff Faser in €/Stück	75,60	25,20	21,00	
Rohstoff Matrix in €/Stück	8,40	8,40	8,40	
Transportmaterial in €/Stück	0,20	0,20	0,20	
Fertigungsstunden in h	Faserherstellung (40 €/h)	1,13	0,38	0,32
	Braiding (30 €/h)	12,00	2,00	1,00
	Injektionsverfahren (40 €/h)	0,23	0,23	0,23
	mech. Nachbearbeitung (30 €/h)	0,50	0,50	0,50
Maschinenstunden in h	Faserherstellung	2,53	0,56	0,38
	Braiding	12,00	2,00	1,00
	Injektionsverfahren	0,23	0,23	0,23
	mech. Nachbearbeitung	0,95	0,95	0,95

Tabelle 12: Eingabedaten für Kostenrechnung

Eingabedaten				
Produkt	24 K Antriebswelle	48 K Antriebswelle	96 K Antriebswelle	
Menge in Stück	4500,00	4500,00	4500,00	
Rohstoff Faser in €/Stück	16,80	15,12	12,60	
Rohstoff Matrix in €/Stück	8,40	8,40	8,40	
Transportmaterial in €/Stück	0,20	0,20	0,20	
Fertigungsstunden in h	Faserherstellung (40 €/h)	0,25	0,23	0,19
	Braiding (30 €/h)	0,50	0,25	0,13
	Injektionsverfahren (40 €/h)	0,23	0,23	0,23
	mech. Nachbearbeitung (30 €/h)	0,50	0,50	0,50
	Faserherstellung	0,30	0,27	0,25
Maschinenstunden in h	Braiding	0,50	0,25	0,13
	Injektionsverfahren	0,23	0,23	0,23
	mech. Nachbearbeitung	0,95	0,95	0,95

Tabelle 13: Eingabedaten für Kostenrechnung (Fortsetzung)

Berechnungen				
Produkt		1 K Antriebswelle	6 K Antriebswelle	12 K Antriebswelle
Fertigungsstunden in h	Faserherstellung	5103,00	1701,00	1417,50
	Braiding	54000,00	9000,00	4500,00
	Injektionsverfahren	1035,00	1035,00	1035,00
	mech. Nachbearbeitung	2250,00	2250,00	2250,00
Fertigungslohn in €/Stück	Faserherstellung	45,36	15,12	12,60
	Braiding	360,00	60,00	30,00
	Injektionsverfahren	9,20	9,20	9,20
	mech. Nachbearbeitung	15,00	15,00	15,00
Maschinenstunden in h	Faserherstellung	11390,63	2531,25	1687,50
	Braiding	54000,00	9000,00	4500,00
	Injektionsverfahren	1035,00	1035,00	1035,00
	mech. Nachbearbeitung	4275,00	4275,00	4275,00

Tabelle 14: Berechnungen für Kostenrechnung

Berechnungen					
Produkt		24 K Antriebswelle	48 K Antriebswelle	96 K Antriebswelle	Gesamt
Fertigungsstunden in h	Faserherstellung	1134,00	1020,60	850,50	11226,60
	Braiding	2250,00	1125,00	562,50	71437,50
	Injektionsverfahren	1035,00	1035,00	1035,00	6210,00
	mech. Nachbearbeitung	2250,00	2250,00	2250,00	13500,00
Fertigungslohn in €/Stück	Faserherstellung	10,08	9,07	7,56	
	Braiding	15,00	7,50	3,75	
	Injektionsverfahren	9,20	9,20	9,20	
	mech. Nachbearbeitung	15,00	15,00	15,00	
Maschinenstunden in h	Faserherstellung	1350,00	1215,00	1125,00	19299,38
	Braiding	2250,00	1125,00	562,50	71437,50
	Injektionsverfahren	1035,00	1035,00	1035,00	6210,00
	mech. Nachbearbeitung	4275,00	4275,00	4275,00	25650,00

Tabelle 15: Berechnungen für Kostenrechnung (Fortsetzung)

7.2 Kostenarten

In der Berechnung wurden die Kostenstellen Lagerhaltung, Materialeingangsprüfung, Faserherstellung, Braiding, Injektionsverfahren, mech. Nachbearbeitung und Verwaltung und Vertrieb berücksichtigt.

In den Einzelkosten ist deutlich ersichtlich, dass mit zunehmender Filamentanzahl pro Roving, nicht nur die Materialeinzelkosten, sondern auch der Faktor „menschliche Arbeit“ beim Herstellungsprozess Braiding sinkt.

Kostenarten				
Produkt	1 K Antriebswelle	6 K Antriebswelle	12 K Antriebswelle	
Materialeinzelkosten in €	Rohstoff	378000,00	151200,00	132300,00
	Transportmaterial	900,00	900,00	900,00
Fertigungseinzelkosten in €	Faserherstellung	204120,00	68040,00	56700,00
	Braiding	1620000,00	270000,00	135000,00
	Injektionsverfahren	41400,00	41400,00	41400,00
	mech. Nachbearbeitung	67500,00	67500,00	67500,00
Σ Einzelkosten in €		2311920,00	599040,00	433800,00
Materialgemeinkosten in €	Lagerhaltung			
	Materialeingangsprüfung			
Fertigungsgemeinkosten in €	Faserherstellung			
	Braiding			
	Injektionsverfahren			
	mech. Nachbearbeitung			
Verwaltungs- u. Vertriebsgemeinkosten in €				
Σ Gemeinkosten in €				
Σ Kosten in €				

Tabelle 16: Kostenarten

Kostenarten						
Produkt		24 K Antriebswelle	48 K Antriebswelle	96 K Antriebswelle	Gesamt	
Materialeinzelkosten in €	Rohstoff	113400,00	105840,00	94500,00	975240,00	
	Transportmaterial	900,00	900,00	900,00	5400,00	
Fertigungseinzelkosten in €	Faserherstellung	45360,00	40824,00	34020,00	449064,00	
	Braiding	67500,00	33750,00	16875,00	2143125,00	
	Injektionsverfahren	41400,00	41400,00	41400,00	248400,00	
	mech. Nachbearbeitung	67500,00	67500,00	67500,00	405000,00	
Σ Einzelkosten in €		336060,00	290214,00	255195,00	4226229,00	
Materialgemeinkosten in €	Lagerhaltung					
	Materialeingangsprüfung					
Fertigungsgemeinkosten in €	Faserherstellung					
	Braiding					
	Injektionsverfahren					
	mech. Nachbearbeitung					
Verwaltungs- u. Vertriebsgemeinkosten in €						25000,00
Σ Gemeinkosten in €						75000,00
Σ Kosten in €						520000,00
		900000,00				
		650000,00				
		730000,00				
		250000,00				
		3150000,00				
		7376229,00				

Tabelle 17: Kostenarten (Fortsetzung)

7.3 Maschinenstundenzuschlagssätze

Für die Verrechnung von Fertigungsgemeinkosten werden in der Maschinenstundenkalkulation mengenmäßige Gemeinkostenzuschläge, auf Basis von Zeiten, in diesem Fall der Maschinenstunden, gebildet.⁶⁷

- Der Zuschlagssatz für die Lagerhaltung wird auf die Materialeinzelkosten bezogen.
- Der Zuschlagssatz für die Materialeingangsprüfung wird auf die Rohstoffkosten bezogen.
- Der Zuschlagssatz für die Faserherstellung wird auf die Maschinenstunden der Faserherstellung bezogen.
- Der Zuschlagssatz für das Braiding wird auf die Maschinenstunden beim Braiding-Prozess bezogen.
- Der Zuschlagssatz für das Injektionsverfahren wird auf die Maschinenstunden beim Injektionsverfahren bezogen.
- Der Zuschlagssatz für die mech. Nachbearbeitung wird auf die Maschinenstunden in der mech. Nachbearbeitung bezogen.

Die daraus errechneten Zuschlagssätze sind in Tabelle 18 ersichtlich.

⁶⁷ Vgl. Stelling, Johannes N. (2005), S.137

Maschinenstundensatzkalkulation				
Zuschlagsätze				
Kostenstelle	Gemeinkosten in €	Bezugsgröße		Zuschlagssatz
Lagerhaltung	25000,00	Material Einzelkosten in €	980640,00	2,55 %
Material eingangsprüfung	75000,00	Rohstoff in €	975240,00	7,69 %
Faserherstellung	520000,00	Mi-Std. Faserherstellung in h	19299,38	26,94 €/h
Braiding	900000,00	M-Std. Braiding in h	71437,50	12,60 €/h
Injektionsverfahren	650000,00	Mi-Std. Injektionsverfahren in h	6210,00	104,67 €/h
mech. Nachbearbeitung	730000,00	M-Std. mech. Nachbearbeitung in h	25650,00	28,46 €/h
Verwaltungs- u. Vertriebsgemeinkosten	250000,00	Herstellkosten in €	7126229,00	3,51 %
Summe	3150000,00			

Tabelle 18: Zuschlagsätze

7.4 Maschinenstundensatzkalkulation

In der Maschinenstundensatzkalkulation erfolgt nun eine Verteilung der Gemeinkosten. Die sich daraus ergebenden Fertigungsgemeinkosten für jede Variante und die errechneten Herstellkosten sind in den Tabellen 19 und 20 ersichtlich.

Maschinenstundensatzkalkulation			
Produkt	1 K Antriebswelle	6 K Antriebswelle	12 K Antriebswelle
Rohstoffe	84,00	33,60	29,40
Transportmaterial	0,20	0,20	0,20
Lagerhaltung	2,15	0,86	0,75
Materialeingangsprüfung	6,46	2,58	2,26
Materialkosten in €	92,81	37,25	32,62
Lohn-Faserherstellung	45,36	15,12	12,60
FGK Faserherstellung	30,55	10,18	8,49
Lohn-Braiding	360,00	60,00	30,00
FGK Braiding	151,18	25,20	12,60
Lohn-Injektionsverfahren	9,20	9,20	9,20
FGK Injektionsverfahren	24,07	24,07	24,07
Lohn-mech. Nachbearbeitung	15,00	15,00	15,00
FGK mech. Nachbearbeitung	27,04	27,04	27,04
Fertigungskosten in €	662,41	185,81	139,00
Herstellkosten in €	755,21	223,06	171,61
Verwaltungs- u. Vertriebskosten	26,49	7,83	6,02
Selbstkosten in €	781,71	230,88	177,63

Tabelle 19: Maschinenstundensatzkalkulation

Maschinenstundensatzkalkulation			
Produkt	24 K Antriebswelle	48 K Antriebswelle	96 K Antriebswelle
Rohstoffe	25,20	23,52	21,00
Transportmaterial	0,20	0,20	0,20
Lagerhaltung	0,65	0,60	0,54
Materialeingangsprüfung	1,94	1,81	1,61
Materialkosten in €	27,99	26,13	23,36
Lohn-Faserherstellung	10,08	9,07	7,56
FGK Faserherstellung	6,79	6,11	5,09
Lohn-Braiding	15,00	7,50	3,75
FGK Braiding	6,30	3,15	1,57
Lohn-Injektionsverfahren	9,20	9,20	9,20
FGK Injektionsverfahren	24,07	24,07	24,07
Lohn-mech. Nachbearbeitung	15,00	15,00	15,00
FGK mech. Nachbearbeitung	27,04	27,04	27,04
Fertigungskosten in €	113,48	101,14	93,29
Herstellkosten in €	141,47	127,28	116,64
Verwaltungs- u. Vertriebskosten	4,96	4,47	4,09
Selbstkosten in €	146,43	131,74	120,74

Tabelle 20: Maschinenstundensatzkalkulation (Fortsetzung)

7.5 Ergebnisse

Die doch deutlichen Unterschiede im Rohmaterialpreis schlagen sich sinngemäß auch in den Materialkosten nieder. Je nach verwendetem Roving kommt es hier zu einer Streuung von 400% zwischen den CFK-Antriebswellen-Varianten.

Die Kosten für die Faserherstellung und den Wickelprozess sind sehr stark vom verwendeten Rohmaterial abhängig. In Abbildung 27 lässt sich sehr schön erkennen, dass der Prozesskostenanstieg durch gesteigerte Roving-Qualität „nicht“ linear verläuft.

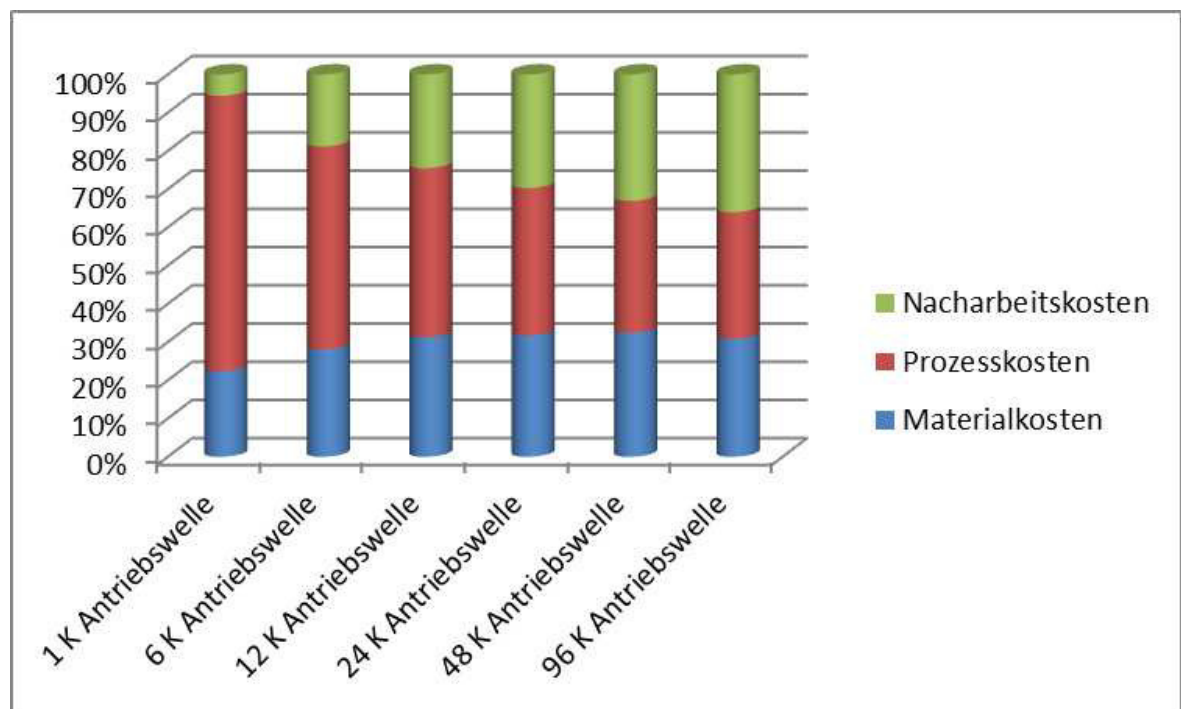


Abbildung 27: Vergleich-Kostenverteilung

Das Injektionsverfahren und die mechanische Fertigung sind bei jeder Variante identisch, da die Anzahl der Filamente pro Roving keinen Einfluss auf diese Prozesse hat.

Unter der Verwendung von Standard-Rovings mit 48 K ergeben sich Herstellkosten von ca. 140 Euro. Das entspricht einem umgerechneten Kilopreis von 70 Euro. Dieser Preis korreliert ausgezeichnet mit gängigen Marktpreisen.

Die in Tabelle 28 gezeigten Herstellkosten verdeutlichen ziemlich eindeutig, dass mit gesteigerter Roving-Qualität eine enorme Kostensteigerung möglich ist. Kostenersparnisse sind dadurch aber nur kaum realisierbar.

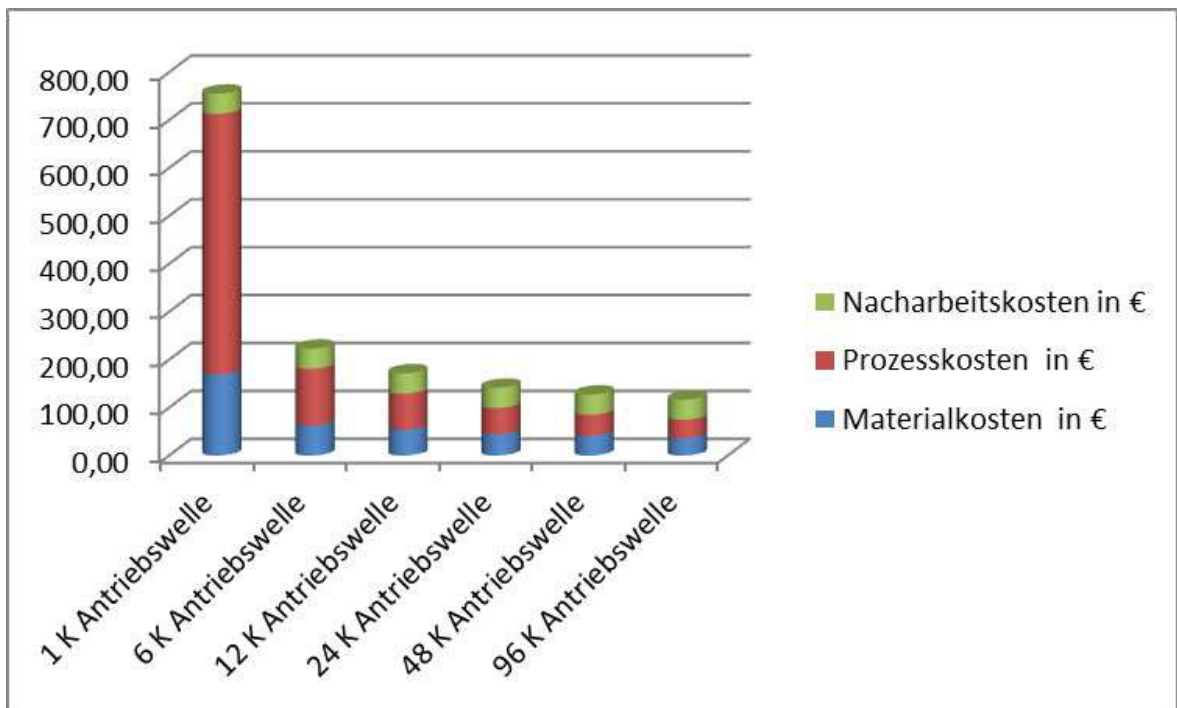


Abbildung 28: Vergleich-Herstellkosten

Bei einer Produktion dieser Antriebswellen mit den günstigeren Rovings, würde sich immer noch ein Kilopreis von ca. 58 Euro errechnen. Dieser ist zwar um vieles niedriger, liegt aber deutlich über der Kostenobergrenze von 15 Euro, die sich aus dem Verhältnis der spezifischen Festigkeit und spezifischen Steifigkeit von CFK zu Stahl ergibt.

8 Conclusio

Durch die Umsetzung von konsequentem Leichtbau und CFK-gerechter Auslegung der Bauteile ist eine Gewichtsreduktion um 70 % gegenüber Stahl, um 30 % gegenüber Aluminium realisierbar. Die Kosten für den im KFZ verbauten Stahl liegen derzeit bei etwa 3 €/kg, für hochfesten Stahl bei ca. 6 €/kg und für Aluminium bei 7 €/kg. Im Vergleich dazu liegt CFK, mit deutlich höheren Rohstoffkosten und kostenintensiveren Fertigungsprozessen, derzeit noch bei 70 €/kg.⁶⁸

Diese doch deutliche Abweichung zum geforderten Zielwert von 15 €/kg, um FKV auch in der Großserie einzusetzen, kann zumindest den Ausspruch von Studenten der Montanuniversität Leoben:

„Wer Kunststoff kennt nimmt Stahl“, zum heutigen Zeitpunkt nicht entkräften.

Nichtsdestotrotz ist deutlich zu erkennen, dass sich Profiliziehverfahren und Wickelverfahren für eine intensivere Entwicklung von adäquaten Berechnungsmethoden anbieten, da Analysten mit einer jährlichen Bedarfssteigerung von 15% an CFK in der Automobilindustrie rechnen.⁶⁹

⁶⁸ Vgl. Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.12

⁶⁹ Vgl. Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar (2012), S.12

9 Ausblick

Die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Faser-Kunststoff-Verbunde steckt, im Vergleich zu denen der Stähle, noch in den Kinderschuhen.

Anhand der noch offenen Möglichkeiten und des gesetzlichen Drucks auf alle Automobilhersteller, ihre Autos leichter zu bauen, liegt die Vermutung nahe, dass sich in naher Zukunft noch einiges auf diesem Gebiet tun wird. Auch die Vermeidung von kostenintensiven Batteriesystemen, in alternativen Antriebssystemen, wird die Automobilkonzerne dazu bewegen, noch schneller noch leichter zu werden und den Leichtbau, in welcher Form auch immer, an seine Spitze zu treiben

Literatur

AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. - 3., vollständig überarbeitete Auflage. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010

Brünglinghaus, Christiane: Magnesium: Konkurrenz für Polymerwerkstoffe und Aluminium. URL: <<http://www.springerprofessional.de/magnesium-konkurrenz-fuer-polymerwerkstoffe-und-aluminium/3156328.html>>, verfügbar am 8.2.2013

Drechsler, Klaus: Carbon-Faserverbund: Potentiale und Risiken im Automobilbau. - Stand: 13.10.2012. - SGL Group, 2012

Fachverband Ingenieurbüros in der WKO: Werkstoffwissenschaften. In: read ING.. - Salzburg: Ramses direct GmbH., (2012)49, S.6-7

Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM): Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. - 6., überarbeitete Ausgabe. - VDMA-Verlag, 2012

Härdler, Jürgen (Hrsg.): Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure: Lehr- und Praxisbuch für Ingenieure und Wirtschaftsingenieure. - 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. - München: Carl Hanser Verlag, 2007

Jäckl, Joachim: Hand in Hand bauen acht Roboter Carbonteile. URL: <http://www.industrieanzeiger.de/fabrik-der-zukunft/-/article/32571342/37426812/Hand-in-Hand-bauen-acht-Roboter-Carbonteile/art_co_INSTANCE_0000/maximized/>, verfügbar am 10.2.2013

Jahn, Bernhard; Karl, Doris; Witten, Elmar: Composites-Marktbericht 2012: Marktentwicklung, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. - Stand: 8. Oktober 2012. - Carbon Composites e. V. (CCeV), 2012

Jung, Hans: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. - 12. Auflage. - München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2010

Klein, Bernd: Leichtbau-Konstruktionen: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. - 9., überarbeitete und erweiterte Auflage. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011

Monse, Philipp: Die Aluminiumkarosserie des neuen Jaguar-Topmodel XJ. URL: <<http://www.springerprofessional.de/die-aluminiumkarosserie-des-neuen-jaguar-topmodells-xj-4236/3938494.html>>, verfügbar am 6.2.2013

Pascheck, Laurin: Titanauspuff für den BMW M5. URL: <<http://www.motor-talk.de/news/titanauspuff-fuer-den-bmw-m5-t4076715.html>>, verfügbar am 10.2.2013

Rees, Jürgen: Wie Autos abspecken. URL: <<http://www.zeit.de/auto/2012-12/leichtbau-auto-sprit>>, verfügbar am 15.1.2013

Scheitle, Johann P.: Leistungsfähige Faserverbundanwendungen in Hubschraubern und Flugzeugen.- Eurocopter Dtl. GmbH, 2012

Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. - 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. - Heidelberg: Springer-Verlag, 2007

Stelling, Johannes N.: Kostenmanagement und Controlling. - 2., überarbeitete Auflage. - München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2005

Anlagen

Festigkeitskennwerte Stahl	A-1
Festigkeitskennwerte Aluminium.....	A-10
Festigkeitskennwerte Magnesium	A-35
Festigkeitskennwerte Titan	A-36

Anlagen, Festigkeitskennwerte Stahl

Tabelle 5.1.2 Festigkeitskennwerte in MPa und Bruchdehnung A in % für unlegierten Baustahl nach DIN EN 10 025-2 (April 2005) ⁴¹

Sorte	Werkstoff Nr.	$R_{m,N}$	$R_{e,N}$ ⁴²	A	$\sigma_{W,zf,N}$	$\sigma_{Sch,zf,N}$	$\sigma_{W,b,N}$	$T_{W,zf,N}$	$T_{W,b,N}$
S185	1.0035	310	185	10	140	138	155	80	90
S235JR	1.0038	360	235	17	160	158	180	95	105
S235J0	1.0114								
S235J2	1.0117								
S275JR	1.0044	430	275	15	195	185	215	110	125
S275J0	1.0143								
S275J2G	1.0145								
S355JR	1.0045	510	355	14	230	215	255	130	150
S355J0	1.0553								
S355J2	1.0577								
S355K2	1.0596								
S450J0	1.0590	550	450	—	250	225	275	145	160
E295	1.0050	490	295	12	220	205	245	125	145
E335	1.0060	590	335	8	265	240	290	155	170
E360	1.0070	690	360	4	310	270	340	180	200

⁴¹ Gleichwertiger Durchmesser $d_{eff,N} = 40$ mm.

⁴² $R_{e,N} / R_{m,N} < 0,75$ für alle Werkstoffsorten.

Tabelle 5.1.3 Festigkeitskennwerte in MPa und Bruchdehnung A in % für schweißgeeigneten Feinkornbaustahl im normalgeglühten Zustand nach DIN EN 10 025-3 (Februar 2005) und DIN EN 10 025-4 (April 2004) ⁴³

Sorte	Werkstoff Nr.	$R_{m,N}$	$R_{e,N}$ ⁴²	A	$\sigma_{W,zf,N}$	$\sigma_{Sch,zf,N}$	$\sigma_{W,b,N}$	$T_{W,zf,N}$	$T_{W,b,N}$	$a_{L,0}$ ⁴³	$a_{d,0}$ ⁴³
S 275 N	1.0490	370	275	24	165	160	185	95	110	0,30	0,30
S 275 NL	1.0491										
S 355 N	1.0545	470	355	22	210	200	235	120	140	0,25	0,28
S 355 NL	1.0546										
S 420 N	1.8902	520	420	19	235	215	260	135	150	0,23	0,30
S 420 NL	1.8912										
S 460 N	1.8901	550	460	17	245	225	275	140	160	0,00	0,22
S 460 NL	1.8903										
S 275 M	1.8818	360	275	24	160	158	180	95	105	0,30	0,30
S 275 ML	1.8819										
S 355 M	1.8823	450	355	22	205	190	225	115	130	0,25	0,28
S 355 ML	1.8834										
S 420 M	1.8825	500	420	19	225	210	250	130	145	0,23	0,30
S 420 ML	1.8836										
S 460 M	1.8827	530	460	17	240	220	265	140	155	0,00	0,22
S 460 ML	1.8838										

⁴¹ Gleichwertiger Durchmesser für die Zugfestigkeit $d_{eff,N} = 100$ mm, für die Streckgrenze $d_{eff,N} = 30$ mm.

⁴² $R_{e,N} / R_{m,N} < 0,75$ bis einschließlich S 275, $R_{e,N} / R_{m,N} > 0,75$ ab S 355.

⁴³ Genauere, werkstoffsortenabhängige Werte anstelle der nur werkstoffgruppenabhängigen Werte in Tabelle 1.2.1 bzw. Tabelle 3.2.1.

Tabelle 21: Festigkeitswerte für unlegierten Baustahl und schweißgeeigneten Feinkornbaustahl⁷⁰

⁷⁰ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.113

Tabelle 5.1.4 Festigkeitskennwerte in MPa und Bruchdehnung A in % für Vergütungsstahl im vergüteten Zustand nach DIN EN 10083-2 (Dezember 2006) und DIN EN 10083-3 (Januar 2007) ⁷¹

Sorte, Bezeichnung	Werkstoff Nr.	R _{0,2N}	R _{0,2N}	A	σ _{W,0,2N}	σ _{Sch,0,2N}	σ _{W,H,N}	T _{W,H,N}	T _{W,A,N}	a ₄₀ +1	a ₄₀ +3
C22E C22R	1.1151 1.1149	500	340	20	225	210	250	130	145	0,19	0,43
C35E C35R C35	1.1181 1.1180 1.0501	630	430	17	285	255	310	165	185	0,20	0,39
C40E C40R C40	1.1186 1.1189 1.0511	650	460	16	295	260	320	170	190	0,12	0,36
C45E C45R C45	1.1191 1.1201 1.0503	700	490	14	315	275	345	180	205	0,16	0,36
C50E C50R	1.1206 1.1241	750	520	13	340	290	365	195	215	0,21	0,35
C55E C55R C55	1.1203 1.1209 1.0535	800	550	12	360	305	390	210	230	0,19	0,35
C60E C60R C60	1.1221 1.1223 1.0601	850	580	11	385	320	415	220	245	0,18	0,34
28Mn6	1.1170	800	590	13	360	305	390	210	230	0,30	0,38
38Cr2	1.7003	800	550	14	360	305	390	210	230	0,37	0,52
46Cr2	1.7006	900	650	12	405	335	435	235	260	0,41	0,54
34Cr4 34CrS4 ⁷⁴	1.7033 1.7037	900	700	12	405	335	435	235	260	0,33	0,49
37Cr4 37CrS4 ⁷⁴	1.7034 1.7038	950	750	11	430	345	460	245	270	0,32	0,46
41Cr4 41CrS4 ⁷⁴	1.7035 1.7039	1000	800	11	450	360	480	260	285	0,30	0,44
25CrMo4 25CrMoS4 ⁷⁴	1.7218 1.7213	900	700	12	405	335	435	235	260	0,33	0,49
34CrMo4 34CrMoS4 ⁷⁴	1.7220 1.7226	1000	800	11	450	360	480	260	285	0,30	0,44
42CrMo4 42CrMoS4 ⁷⁴	1.7225 1.7227	1100	900	10	495	385	525	285	315	0,32	0,43
50CrMo4	1.7228	1100	900	9	495	385	525	285	315	0,28	0,38
34CrNiMo6	1.6582	1200	1000	9	540	410	570	310	340	0,33	0,39
30CrNiMo8 ⁷¹	1.6580	1250	1050	9	565	420	595	325	355	0,36	0,42
35NiCr6	1.5815	880	740	12	395	330	430	230	250	0,18	0,23
36NiCrMo16 ⁷¹	1.6773	1250	1050	9	565	420	595	325	350	0,28	0,32
39NiCrMo3	1.6510	980	785	11	440	355	470	255	280	0,25	0,31
30NiCrMo16-6	1.6747	1080	880	10	485	380	520	280	310	0,37	0,42
51CrV4	1.8159	1100	900	9	495	385	525	285	315	0,28	0,33

⁷¹ Gleichwertiger Durchmesser d_{0,2N} = 40 mm für 30CrNiMo8 und 36NiCrMo16, d_{0,2N} = 100 mm für 30NiCrMo16-6, für alle anderen d_{0,2N} = 16 mm.
⁷² R_{0,2N} / R_{0,2N} < 0,75 bis einschließlich 46 Cr 2, 46 CrS 2; R_{0,2N} / R_{0,2N} ≥ 0,75 ab 34 Cr 4, 34 CrS 4.

⁷³ Genauere, werkstoffsortenabhängige Werte anstelle der nur werkstoffgruppenabhängigen Werte in Tabelle 1.2.1 bzw. Tabelle 3.2.1.

⁷⁴ Für ermüdungsbeanspruchte Bauteile mit Vorsicht zu verwenden, da der Schwefelzusatz eine Verringerung der Korrosionsbeständigkeit bewirkt.

Tabelle 22: Festigkeitswerte für Vergütungsstahl⁷¹

⁷¹ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.114

Tabelle 5.1.5 Festigkeitskennwerte in MPa und Bruchdehnung A in % für Vergütungsstahl im normalgeglühten Zustand nach DIN EN 10083-2 (Dezember 2006) ⁴¹⁾

Sorte, Bezeichnung	Werkstoff Nr.	R _{m,N}	R _{e,N} ≤ 0,2	A	σ _{W,2d,N}	σ _{Sch,2d,N}	σ _{W,h,N}	τ _{W,N}	τ _{W,L,N}	a _{d,m} ≥ 3	a _{d,p} ≤ 3
C22E C22R	1.1151 1.1149	430	240	24	195	185	215	110	125	0,08	0,19
C35E C35R C35	1.1181 1.1180 1.0501	550	300	18	250	225	275	145	160	0,10	0,19
C40E C40R C40	1.1186 1.1189 1.0511	580	320	16	260	235	285	150	170	0,09	0,19
C45E C45R C45	1.1191 1.1201 1.0503	620	340	14	280	250	305	160	180	0,10	0,20
C50E C50R	1.1206 1.1241	650	355	13	295	260	320	170	190	0,10	0,19
C55E C55R C55	1.1203 1.1209 1.0535	680	370	11	305	270	335	175	195	0,09	0,20
C60E C60R C60	1.1221 1.1223 1.0601	710	380	10	320	280	350	185	205	0,09	0,19
28Mn6	1.1170	630	345	17	285	250	310	165	185	0,07	0,17

⁴¹⁾ Gleichwertiger Durchmesser d_{GLS} = 16 mm.

⁴²⁾ R_{e,N} / R_{m,N} < 0,75 für alle Werkstoffsorten.

⁴³⁾ Genauere, werkstoffsortenabhängige Werte anstelle der nur werkstoffgruppenabhängigen Werte in Tabelle 1.2.1 bzw. Tabelle 3.2.1.

Tabelle 23: Festigkeitswerte für Vergütungsstahl⁷²

⁷²⁾ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.115

Tabelle 5.1.6 Festigkeitskennwerte in MPa und Bruchdehnung A in % für Einsatzstahl im blindgehärteten Zustand ^{⊖1} nach DIN EN 10 084 (Juni 2008) (Auswahl) ^{⊖2}

Sorte ^{⊖3}	Werkstoff Nr.	R _{m,N}	R _{e,N} ⊖4 ⊖5	A ⊖6	σ _{W,z,N}	σ _{Sch,z,N}	σ _{W,h,N}	T _{W,z,N}	T _{W,h,N}	a _{d,m} ⊖7
C10E	1.1121	500	310	16	200	185	220	115	130	0,56
C15E	1.1141	800	545	14	320	270	345	185	205	0,68
C16E	1.1148	800	545		320	270	345	185	205	0,68
17Cr3	1.7016	800	545	11	320	270	345	185	205	0,37
28Cr4 *	1.7030	900	620		360	295	385	210	230	0,33
16MnCr5 *	1.7131	1000	695	10	400	320	430	230	255	0,44
20MnCr5 *	1.7147	1200	850	8	480	365	510	280	305	0,48
18CrMo4 *	1.7243	1100	775		440	340	470	255	280	0,52
18CrMoS4 * ^{⊖8}	1.7244	1100	775		440	340	470	255	280	0,52
22CrMoS3-5 * ^{⊖8}	1.7333	1100	775	8	440	340	470	255	280	0,28
20MoCr3	1.7320	900	620		360	295	385	210	230	0,33
20MoCr4	1.7321	900	620	10	360	295	385	210	230	0,33
16NiCr4	1.5714	1000	695		400	320	430	230	255	0,30
10NiCr5-4 *	1.5805	900	620		360	295	385	210	230	0,61
18NiCr5-4 *	1.5810	1200	850		480	365	510	280	305	0,37
17CrNi6-6 *	1.5918	1200	850		480	365	510	280	305	0,37
15NiCr13 *	1.5752	1000	695		400	320	430	230	255	0,30
20NiCrMo2-2 *	1.6523	1100	775	10	440	340	470	255	280	0,52
17NiCrMo6-4 *	1.6566	1200	850		480	365	510	280	305	0,37
20NiCrMoS6-4 * ^{⊖8}	1.6571	1200	850		480	365	510	280	305	0,37
18CrNiMo7-6 *	1.6587	1200	850	8	480	365	510	280	305	0,37
14NiCrMo13-4 *	1.6657	1200	850		480	365	510	280	305	0,37

^{⊖1} Werte nur zur Information, nach DIN EN 10 084 Anhang F. Hier heißt es: „Zugfestigkeit nach dem Vergüten bei 200°C“.

^{⊖2} Gleichwertiger Durchmesser d_{eq,N} = 16 mm.

^{⊖3} Nur bis 40 mm Durchmesser, die mit * markierten Sorten aber bis 100 mm.

^{⊖4} R_{e,N} nach DIN 17 210 (Entwurf Oktober 1984), angepasst.

^{⊖5} R_{e,N} / R_{m,N} < 0,75 für alle Werkstoffsorten.

^{⊖6} A nach DIN 17 210 (Entwurf Oktober 1984), soweit angegeben.

^{⊖7} Genauere, werkstoffsortenabhängige Werte anstelle der nur werkstoffgruppenabhängigen Werte in Tabelle 1.2.1 bzw. Tabelle 3.2.1.

^{⊖8} Für ermüdungsbeanspruchte Bauteile mit Vorsicht zu verwenden, da der Schwefelzusatz eine Verringerung der Korrosionsbeständigkeit bewirkt.

Tabelle 5.1.7 Festigkeitskennwerte in MPa für Nitrierstahl im vergüteten Zustand nach DIN EN 10 085 (Juli 2001) ^{⊖1}

Sorte	Werkstoff Nr.	R _{m,N}	R _{e,N} ⊖2	A ⊖3	σ _{W,z,N}	σ _{Sch,z,N}	σ _{W,h,N}	T _{W,z,N}	T _{W,h,N}	a _{d,m} ⊖4	a _{d,p} ⊖4
24CrMo13-6	1.8516	1000	800		450	360	480	260	285	0,22	0,26
31CrMo12	1.8515	1030	835	11	465	370	495	270	295	0,21	0,27
32CrAlMo7-10	1.8505	1030	835		465	370	495	270	295	0,21	0,27
31CrMoV5	1.8519	1100	900	11	495	385	525	285	315	0,31	0,36
33CrMoV12-9	1.8522	1150	950		520	395	550	300	330	0,30	0,35
34CrAlNi7-10	1.8550	900	680	12	405	335	435	235	260	0,17	0,17
41CrAlMo7-10	1.8509	950	750		430	345	460	250	275	0,23	0,24
40CrMoV13-9	1.8523	950	750		430	345	460	250	275	0,23	0,24
34CrAlMoS-10	1.8507 ^{⊖5}	800	600	14	360	305	390	210	230	0,00	0,00

^{⊖1} Gleichwertiger Durchmesser d_{eq,N} = 40 mm.

^{⊖2} R_{e,N} / R_{m,N} > 0,75 für alle Werkstoffsorten.

^{⊖3} A nach DIN 17211 (April 1987), soweit angegeben.

^{⊖4} Genauere, werkstoffsortenabhängige Werte anstelle der nur werkstoffgruppenabhängigen Werte in Tabelle 1.2.1 bzw. Tabelle 3.2.1.

^{⊖5} Nur bis 100 mm Durchmesser.

Tabelle 24: Festigkeitswerte für Einsatzstahl und Nitrierstahl⁷³

⁷³ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.116

Tabelle 5.1.8 Festigkeitskennwerte in MPa für nichtrostenden Stahl
nach DIN EN 10 088-2 (September 2005) (Auswahl) ^{41) 42)}

Sorte	Werkstoff-Nr.	Erzeugnis- form ⁴³⁾	R _{m,N}	R _{e,N}	A	σ _{W,0,1N}	σ _{Sch,0,1N}	σ _{W,1,N}	τ _{W,1,N}	τ _{W,1,N}
-------	---------------	-----------------------------------	------------------	------------------	---	---------------------	-----------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Ferritische Stähle im geglähten Zustand, Standardgüten.

X2CrNi12	1.4003	P(25)	450	250	18	180	170	205	105	120
X6CrAl13	1.4002	P(25)	400	210	17	160	155	180	90	110
X6Cr17	1.4016	P(25)	430	240	20	170	165	195	100	115
X6CrMo17-1	1.4113	H(12)	450	260	18	180	170	205	105	120

Ferritische Stähle im geglähten Zustand, Sondergüten.

X6CrNi17-1	1.4017	C(6)	650	480	12	260	230	290	150	175
X2CrTiNb18	1.4509	C(6)	430	230	18	170	165	195	100	115

Martensitische Stähle im wärmebehandelten Zustand, Standardgüten.

X20Cr13	1.4021	P(75)								
		QT650	650	450	12	260	230	290	150	170
		QT750	750	550	10	300	260	330	175	195
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	P(75)								
		QT840	840	680	14	335	280	370	195	220

Ausscheidungshärtende, martensitische Stähle im wärmebehandelten Zustand, Sondergüten.

X5CrNiCuNb16-4	1.4542	P(50)								
		P1070	1070	1000	8	430	335	460	245	275
		P950	950	800	10	380	310	410	220	245
		P850	850	600	12	340	285	370	195	220

Austenitische Stähle im lösungsgeglühten Zustand, Standardgüten.

X10CrNi18-8	1.4310	C(6)	600	250	40	240	215	270	140	160
X2CrNi18-10	1.4311	P(75)	550	270	40	220	200	245	125	145
X5CrNi18-10	1.4301	P(75)	520	220	45	210	190	235	120	140
X6CrNiTi18-10	1.4541	P(75)	500	200	40	200	185	225	115	135
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	P(75)	520	220	40	210	190	235	120	140
X2CrNiMo17-13-5	1.4439	P(75)	580	270	35	230	210	260	135	155

Austenitische Stähle im lösungsgeglühten Zustand, Sondergüten.

X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	P(75)	650	300	40	260	230	290	150	170
--------------------	--------	-------	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----	-----

Austenitisch-ferritische Stähle im lösungsgeglühten Zustand, Standardgüten.

X2CrNi23-4	1.4362	P(75)	630	400	20	250	225	280	145	165
------------	--------	-------	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----	-----

Austenitisch-ferritische Stähle im lösungsgeglühten Zustand, Sondergüten.

X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	P(75)	730	530	20	290	250	320	170	190
-----------------	--------	-------	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----	-----

⁴¹⁾ Die Ermüdungsfestigkeitskennwerte sind vorläufige Werte.

⁴²⁾ Ein gleichwertiger Durchmesser d_{0,05} ist nicht erforderlich, da innerhalb der Abmessungsbereiche der Werkstoffnorm kein technologischer Größeneinfluss besteht.

⁴³⁾ Erzeugnisform: P(25) wärmegewalztes Blech bis 25 mm Dicke,
H(12) wärmegewalztes Band bis 12 mm Dicke,
C(6) kältgewalztes Band bis 6 mm Dicke,
QT650 im Endzustand bestellt mit Zugfestigkeit 650 MPa,
P1070 wärmegewalztes Blech mit Zugfestigkeit 1070 MPa.

Tabelle 25: Festigkeitswerte für nichtrostenden Stahl⁷⁴

⁷⁴ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.117

Tabelle 5.1.9 Festigkeitskennwerte in MPa von Stahl für größere Schmiedestücke
nach SEW 550 (August 1976) ^{⊕1 ⊕2}

Sorte	Werkstoff Nr.	$R_{m,N}$	$R_{e,N}$	$\sigma_{W,ad,N}$	$\sigma_{Schad,N}$	$\sigma_{W,b,N}$	$\tau_{W,s,N}$	$\tau_{W,z,N}$	$a_{d,m}$ $\phi 3$	$a_{d,p}$ $\phi 3$
-------	------------------	-----------	-----------	-------------------	--------------------	------------------	----------------	----------------	-----------------------	-----------------------

Vergüteter Zustand

Ck 22	1.1151	410	225	165	155	185	95	105	0,00	0,16
Ck 35	1.1181	490	295	195	185	215	115	130	0,00	0,22
Ck 45	1.1191	590	345	235	215	260	135	155	0,00	0,19
Ck 50	1.1206	630	365	250	225	275	145	165	0,00	0,25
Ck 60	1.1221	690	390	275	240	300	160	180	0,00	0,27
20 Mn 5	1.1133	490	295	195	185	215	115	130	0,00	0,22
28 Mn 6	1.1170	590	390	235	215	260	135	155	0,26	0,31
20 MnMoNi 4 5	1.6311	580	420	230	210	255	135	150	0,18	0,23
22 NiMoCr 4 7	1.6755	560	400	225	205	245	130	145	0,00	0,00
24 CrMo 5	1.7258	640	410	255	230	280	150	165	0,24	0,26
34 CrMo 4	1.7220	690	460	275	240	300	160	180	0,23	0,30
42 CrMo 4	1.7225	740	510	295	255	320	170	190	0,34	0,37
50 CrMo 4	1.7228	780	590	310	265	340	180	200	0,23	0,30
32 CrMo 12	1.7361	880	685	350	290	380	205	225	0,27	0,33
34 CrNiMo 6	1.6582	780	590	310	265	340	180	200	0,19	0,26
30 CrNiMo 8	1.6580	880	685	350	290	380	205	225	0,19	0,22
28 NiCrMoV 8 5 ^{⊕2}	1.6932	780	635	310	265	340	180	200	0,22	0,26
33 NiCrMo 14 5 ^{⊕2}	1.6956	930	785	370	305	400	215	235	0,35	0,37

Normalgeglühter Zustand

Ck 22	1.1151	410	225	165	155	185	95	105	0,00	0,16
Ck 35	1.1181	490	275	195	180	215	115	130	0,00	0,19
Ck 45	1.1191	590	325	235	215	260	135	155	0,00	0,16
Ck 50	1.1206	620	345	250	220	270	145	160	0,00	0,15
Ck 60	1.1221	680	375	270	240	295	155	175	0,00	0,14

^{⊕1} Die Ermüdungsfestigkeitskennwerte sind vorläufige Werte.

^{⊕2} Gleichwertiger Durchmesser $d_{eff} = 500$ mm für 28 NiCrMoV 8 5 und $d_{eff} = 1000$ mm für 33 NiCrMo 14 5, für alle anderen Werkstoffsorten $d_{eff} = 250$ mm.

^{⊕3} Genauere, werkstoffartenunabhängige Werte anstelle der nur werkstoffgruppenabhängigen Werte in Tabelle 1.2.1 bzw. Tabelle 3.2.1.

Tabelle 26: Festigkeitswerte für Stahl-Schmiedestücke⁷⁵

⁷⁵ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.118

Tabelle 5.1.10 Festigkeitskennwerte in MPa für Stahlguss für allgemeine Verwendungszwecke
nach DIN EN 10293 (Juni 2005)

Sorte	Werkstoff Nr.	Symbol	$d_{eff,N}$ ÷ 1	$R_{m,N}$	$R_{e,N}$	$\sigma_{W,el,N}$	$\sigma_{Sch,el,N}$	$\sigma_{W,h,N}$	$\tau_{W,h,N}$	$\tau_{W,z,N}$
GE200 (GS-38)	1.0420	+ N	300	380	200	130	110	150	75	90
GE240 (GS-45)	1.0446	+ N	300	450	230	155	125	180	90	110
GE300 (GS-60)	1.0558	+ N	30	600	300	205	160	235	120	140

⁷⁵ Gleichwertiger Rohgussdurchmesser $d_{eff,N}$ in mm.

Tabelle 5.1.11 Festigkeitskennwerte in MPa für Vergütungsstahlguss für allgemeine Verwendungszwecke
nach DIN EN 10293 (Juni 2005)

Sorte	Werkstoff Nr.	Symbol	$d_{eff,N}$ ÷ 1	$R_{m,N}$	$R_{e,N}$	$\sigma_{W,el,N}$	$\sigma_{Sch,el,N}$	$\sigma_{W,h,N}$	$\tau_{W,h,N}$	$\tau_{W,z,N}$
G17Mn5	1.1131	+ QT	50	450	240	155	125	180	90	110
G20Mn5	1.6220	+ N	30	480	300	165	135	190	95	115
		+ QT	100	500	300	170	140	200	100	120
G24Mn6	1.1118	+ QT1	50	700	550	240	185	270	140	160
		+ QT2	100	650	500	220	175	250	130	150
		+ QT3	150	600	450	205	160	235	120	140
G28Mn6	1.1165	+ N	250	520	260	175	145	205	100	125
		+ QT	100	600	450	205	160	235	120	140
		+ QT1	50	700	550	240	185	270	140	160
G20Mo5	1.5419	+ QT	100	440	245	150	125	175	85	105
G10MnMoV6-3	1.5410	+ QT1	50	500	380	170	140	200	100	120
		+ QT2	50	600	500	205	160	235	120	140
		+ QT3	100	520	400	175	145	205	100	125
G15CrMoV6-9	1.7710	+ QT1	50	850	700	290	215	320	165	195
		+ QT2	50	980	930	335	240	365	190	220
G17CrMo5-5	1.7357	+ QT	100	490	315	165	135	195	95	115
G17CrMo9-10	1.7379	+ QT	150	590	400	200	160	230	115	140
G26CrMo4	1.7221	+ QT1	100	600	450	205	160	235	120	140
		+ QT2	100	700	550	240	185	270	140	160
G34CrMo4	1.7230	+ QT1	100	700	540	240	185	270	140	160
		+ QT2	100	830	650	280	210	315	165	190
G42CrMo4	1.7231	+ QT1	100	800	600	270	205	305	155	185
		+ QT2	100	850	700	290	215	320	165	195
G30CrMoV6-4	1.7725	+ QT1	100	850	700	290	215	320	165	195
		+ QT2	100	900	750	305	225	340	175	205
G35CrNiMo6-6	1.6579	+ N	150	800	550	270	205	305	155	185
		+ QT1	100	850	700	290	215	320	165	195
		+ QT2	100	900	800	305	225	340	175	205
G9Ni14	1.5638	+ QT	35	500	360	170	140	200	100	120
GX9Ni5	1.5681	+ QT	30	550	380	185	150	215	110	130
G20NiMoCr4	1.6750	+ QT	150	570	410	194	155	223	112	134
G32NiCrMo8-5-4	1.6570	+ QT1	100	850	700	290	215	320	165	195
		+ QT2	100	1050	950	355	250	390	205	235
G17NiCrMo13-6	1.6781	+ QT	200	750	600	255	195	285	145	175
G30NiCrMo14	1.6771	+ QT1	100	900	700	305	225	340	175	205
		+ QT2	100	1100	1000	375	260	405	215	245
GX3CrNi13-4	1.6982	+ QT	300	700	500	240	185	270	140	160
GX4CrNi13-4	1.4317	+ QT	300	760	550	260	195	290	150	175
GX4CrNi16-4	1.4421	+ QT1	300	780	540	265	200	297	153	180
		+ QT2	300	1000	830	340	245	370	195	225
GX4CrNiMo16-5-1	1.4405	+ QT	300	760	540	260	195	290	150	175
GX23CrMoV12-1	1.4931	+ QT	150	740	540	250	190	285	145	170

⁷⁶ Gleichwertiger Rohgussdurchmesser $d_{eff,N}$ in mm.

Tabelle 27: Festigkeitswerte für Stahlguss⁷⁶

⁷⁶ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.119

Tabelle 5.1.12 Festigkeitskennwerte in MPa für Gusseisen mit Kugelgraphit
nach DIN EN 1563 (Oktober 2005) bzw. nach DIN 1693 / 01 (Oktober 1973) (Bezeichnungen in Klammern) ^{⊕1}

Sorte	Werkstoff Nr.	$R_{m,N}$	$R_{p0,2,N}$ ⊕2	A_5 ⊕3	$\sigma_{W,el,N}$	$\sigma_{Sch,el,N}$	$\sigma_{W,L,N}$	$\tau_{W,L,N}$	$\tau_{W,L,N}$ ⊕2
EN-GJS-350-22-LT (GGG-35.3)	EN-JS1015 (0.7033)	350	220	22	120	100	160	75	110
EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014								
EN-GJS-350-22	EN-JS1010								
EN-GJS-400-18-LT (GGG-40.3)	EN-JS1025 (0.7043)	400	240	18	135	110	185	90	120
EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024		250						
EN-GJS-400-18	EN-JS1020		250						
EN-GJS-400-15 (GGG-40)	EN-JS1030 (0.7040)	400	250	15	135	110	185	90	120
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10	155	125	205	100	135
EN-GJS-500-7 (GGG-50)	EN-JS1050 (0.7050)	500	320	7	170	135	225	110	150
EN-GJS-600-3 (GGG-60)	EN-JS1060 (0.7060)	600	370	3	205	160	265	135	180
EN-GJS-700-2 (GGG-70)	EN-JS1070 (0.7070)	700	420	2	240	180	305	155	205
EN-GJS-800-2 (GGG-80)	EN-JS1080 (0.7080)	800	480	2	270	200	340	175	235
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2	305	220	380	200	260

^{⊕1} Gleichwertiger Rohgussdurchmesser $d_{e,N} = 60$.

^{⊕2} $R_{p0,2,N} / R_{m,N} < 0,75$ für alle Werkstoffsorten.

^{⊕3} Bruchdehnung in %. Für nichtduktilen Werkstoff, $A_5 < 6\%$, ist der statische Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen durchzuführen, Kap. 1.0, und der Sicherheitsfaktor um den Summanden A_5 zu erhöhen, Gl. (3.5.4) in Kap. 3.5.

Tabelle 5.1.13 in MPa für Gusseisen mit Lamellengraphit (Grauguss)
nach DIN EN 1561 (Januar 2012) bzw. nach DIN 1691 (Mai 1985) (Bezeichnungen in Klammern) ^{⊕2}

Sorte	Werkstoff Nr.	$R_{m,N}$	$R_{p0,1,N}$	$\sigma_{W,el,N}$	$\sigma_{Sch,el,N}$	$\sigma_{W,L,N}$ ⊕2	$\tau_{W,L,N}$	$\tau_{W,L,N}$ ⊕2
EN-GJL-100 (GG-10) ^{⊕3}	EN-JL1010 (0.6010)	100	-	34	23	52	34	52
EN-GJL-150 (GG-15)	EN-JL1020 (0.6015)	150	100	51	34	78	51	78
EN-GJL-200 (GG-20)	EN-JL1030 (0.6020)	200	130	68	45	102	68	102
EN-GJL-250 (GG-25)	EN-JL1040 (0.6025)	250	165	85	57	126	85	126
EN-GJL-300 (GG-30)	EN-JL1050 (0.6030)	300	195	102	68	150	102	150
EN-GJL-350 (GG-35)	EN-JL1060 (0.6035)	350	230	119	79	173	119	173

^{⊕1} Gleichwertiger Rohgussdurchmesser $d_{e,N} = 20$.

^{⊕2} $\sigma_{W,L,N}$ und $\sigma_{Sch,el,N}$ nach Gl. (5.1.3) und (5.1.4). Die Verwendung der davon abweichenden Werte aus DIN EN 1561 ist zulässig.

^{⊕3} Nicht für tragende Bauteile.

Tabelle 28: Festigkeitswerte für Gusseisen⁷⁷

⁷⁷ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.120

Tabelle 5.1.14 Festigkeitskennwerte in MPa für Temperguss
nach DIN EN 1562 (August 2006) bzw. nach DIN 1692 (Januar 1982) (Bezeichnungen in Klammern) ^{a1}

Sorte	Werkstoff Nr.	$R_{m,N}$	$R_{p0,2,N}$ $\frac{\sigma}{\sigma_L}$	A_3 $\frac{\sigma}{\sigma_L}$	$\sigma_{W,0,2,N}$	$\sigma_{Sch,0,2,N}$	$\sigma_{W,1,N}$	$\tau_{W,1,N}$	$\tau_{W,2,N}$
-------	------------------	-----------	---	------------------------------------	--------------------	----------------------	------------------	----------------	----------------

Nicht entkohlend geglähter Zustand.

EN-GJMB-300-6 (-)	EN-JM1110 (-)	300	-	6	90	75	130	70	100
EN-GJMB-350-10 (GTS-35-10)	EN-JM1130 (0.8135)	350	200	10	105	85	150	80	115
EN-GJMB-450-6 (GTS-45-06)	EN-JM1140 (0.8145)	450	270	6	135	105	190	100	145
EN-GJMB-500-5 (-)	EN-JM1150 (-)	500	300	5	150	115	210	115	160
EN-GJMB-550-4 (GTS-50-04)	EN-JM1160 (0.8155)	550	340	4	165	125	230	125	175
EN-GJMB-600-3 (-)	EN-JM1170 (-)	600	390	3	180	135	250	135	190
EN-GJMB-650-2 (GTS-65-02)	EN-JM1180 (0.8165)	650	430	2	195	145	265	145	205
EN-GJMB-700-2 (GTS-70-02)	EN-JM1190 (0.8170)	700	530	2	210	155	285	160	220
EN-GJMB-800-1 (-)	EN-JM1200 (-)	800	600	1	240	170	320	180	250

Entkohlend geglähter Zustand.

EN-GJMW-350-4 (GTW-35-04)	EN-JM1010 (0.8035)	350	-	4	105	85	150	80	115
EN-GJMW-360-12 (GTW-S 38-12)	EN-JM1020 (0.8038)	360	190	12	110	85	155	80	120
EN-GJMW-400-5 (GTW-40-05)	EN-JM1030 (0.8040)	400	220	5	120	95	170	90	130
EN-GJMW-450-7 (GTW-45-07)	EN-JM1040 (0.8045)	450	260	7	135	105	190	100	145
EN-GJMW-550-4 (-)	EN-JM1050 (-)	550	340	4	165	125	230	125	175

^{a1} Gleichwertiger Rohgussdurchmesser $d_{R,N} = 15$.

^{a2} oberer Tabellenteil: $R_{p0,2,N} / R_{m,N} < 0,75$; nur für GTS-70-02 gilt $R_{p0,2,N} / R_{m,N} > 0,75$; unterer Tabellenteil: $R_{p0,2,N} / R_{m,N} < 0,75$.

^{a3} Bruchdehnung in %. Für nichtduktilen Werkstoff; $A_3 < 6\%$, ist der statische Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen durchzuführen, Kap. 1.0, und der Sicherheitsfaktor um den Summanden A_3 zu erhöhen, Gl. (3.5.4) in Kap. 3.5.

Tabelle 29: Festigkeitswerte für Temperguss⁷⁸

⁷⁸ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.121

Anlagen, Festigkeitskennwerte Aluminium

Tabelle 5.1.16 Festigkeitskennwerte in MPa für Aluminiumknetwerkstoff, Bänder, Bleche, Platten
nach DIN EN 485-2 (Januar 2009) (Auswahl)

Werkstoff	Zustand	Nettstärke in mm über	Nettstärke in mm bis	R _m	R _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,001}	σ _{0,1}	ε _{0,01}	ε _{0,001}	A ⁹¹ %	Härte HB
EN AW-2014 Al Cu4SiMg	T3	≥ 0,4	1,5	395	245	120	85	140	70	85	14	111
		1,5	6,0	400	245	120	90	140	70	85	14	112
	T4 T451	≥ 0,4	1,5	395	240	120	85	140	70	85	14	110
		1,5	6,0	395	240	120	85	140	70	85	14	110
		6,0	12,5	400	250	120	90	140	70	85	14	112
	T451	12,5	40,0	400	250	120	90	140	70	85	10*	112
		40,0	100,0	395	250	120	85	140	70	85	7*	111
	T42	≥ 0,4	6,0	395	230	120	85	140	70	85	14	110
		6,0	12,5	400	235	120	90	140	70	85	14	111
		12,5	25,0	400	235	120	90	140	70	85	12*	111
	T6 T651	≥ 0,4	1,5	440	390	130	95	150	75	95	6	133
		1,5	6,0	440	390	130	95	150	75	95	7	133
		6,0	12,5	450	395	135	95	155	80	95	7	135
	T651	12,5	40,0	460	400	140	95	160	80	100	6*	138
		40,0	60,0	450	390	135	95	155	80	95	5*	135
		60,0	80,0	435	380	130	95	150	75	95	4*	131
		80,0	100,0	420	360	125	90	145	75	90	4*	126
	T62	100,0	120,0	410	350	125	90	145	70	90	4*	123
		≥ 0,4	12,5	440	390	130	95	150	75	95	7	133
		12,5	25,0	450	395	135	95	155	80	95	6*	135
EN AW-2017A Al Cu4MgSi(A)	T4 T451	≥ 0,4	1,5	390	245	115	85	135	70	85	14	110
		1,5	6,0	390	245	115	85	135	70	85	15	110
	T451	6,0	12,5	390	260	115	85	135	70	85	13	111
		12,5	40,0	390	250	115	85	135	70	85	12*	110
		40,0	100,0	385	240	115	85	135	65	85	10*	108
		100,0	120,0	370	240	110	85	130	65	80	8*	105
	T42	120,0	150,0	350	240	105	80	125	60	75	4*	101
		≥ 0,4	3,0	390	235	115	85	135	70	85	14	109
EN AW-2024 Al Cu4MgZn	T4	≥ 0,4	1,5	425	275	130	90	145	75	90	12	120
		1,5	6,0	425	275	130	90	145	75	90	14	120
	T3 T351	≥ 0,4	1,5	435	290	130	95	150	75	95	12	123
		1,5	3,0	435	290	130	95	150	75	95	14	123
		3,0	6,0	440	290	130	95	150	75	95	14	124
		6,0	12,5	440	290	130	95	150	75	95	13	124
	T351	12,5	40,0	430	290	130	95	150	75	90	11*	122
		40,0	80,0	420	290	125	90	145	75	90	8*	120
		80,0	100,0	400	285	120	90	140	70	85	7*	115
		100,0	120,0	380	270	115	85	135	65	85	5*	110
		120,0	150,0	360	250	110	80	130	60	80	5*	104
	T42	≥ 0,4	6,0	425	260	130	90	145	75	90	15	119
		6,0	12,5	425	260	130	90	145	75	90	12	119
		12,5	25,0	420	260	125	90	145	75	90	8*	118
	T8 T851	≥ 0,4	1,5	460	400	140	95	160	80	100	5	138
		1,5	6,0	460	400	140	95	160	80	100	6	138
		6,0	12,5	460	400	140	95	160	80	100	5	138
	T851	12,5	25,0	455	400	135	95	155	80	95	4*	137
		25,0	40,0	455	395	135	95	155	80	95	4*	136
	T62	≥ 0,4	12,5	440	345	130	95	150	75	95	5	129
		12,5	25,0	435	345	130	95	150	75	95	4*	128

⁹¹ Bruchdehnung A mit Messlänge 50 mm bzw. (mit *) Bruchdehnung A₅ mit Messlänge fünfmal Probendurchmesser.

Tabelle 30: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 1⁷⁹

⁷⁹ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.123

Tabelle 5.1.16 Fortsetzung 1 von 7

Werkstoff	Zustand	Nennstärke in mm		R _m	R _e	σ _{0.02}	σ _{0.01}	σ _{0.2}	T _{0.2}	T _{0.1}	A ₈₀ %	Härte HB		
EN AW-4006 Al SiFe	H12	0,2	0,5	120	90	35	35	50	20	30	4	38		
		0,5	1,5	120	90	35	35	50	20	30	4	38		
		1,5	3,0	120	90	35	35	50	20	30	5	38		
	H14	0,2	0,5	140	120	40	40	55	25	35	3	45		
		0,5	1,5	140	120	40	40	55	25	35	3	45		
		1,5	3,0	140	120	40	40	55	25	35	3	45		
	T4	0,2	0,5	120	55	35	35	50	20	30	14	35		
		0,5	1,5	120	55	35	35	50	20	30	16	35		
		1,5	3,0	120	55	35	35	50	20	30	18	35		
	3,0	6,0	120	55	35	35	50	20	30	21	35			
EN AW-4007 Al Si, 5Mn	O/H111	0,2	0,5	110	45	35	30	45	20	25	15	32		
		0,5	1,5	110	45	35	30	45	20	25	16	32		
		1,5	3,0	110	45	35	30	45	20	25	19	32		
		3,0	6,0	110	45	35	30	45	20	25	21	32		
		6,0	12,5	110	45	35	30	45	20	25	25	32		
	H12	≥ 0,2	0,5	140	110	40	40	55	25	35	4	44		
		0,5	1,5	140	110	40	40	55	25	35	4	44		
		1,5	3,0	140	110	40	40	55	25	35	5	44		
		EN AW-5049 Al Mg2Mn0,8	O/H111	0,2	0,5	190	80	55	50	75	35	45	12	52
				0,5	1,5	190	80	55	50	75	35	45	14	52
1,5	3,0			190	80	55	50	75	35	45	16	52		
3,0	6,0			190	80	55	50	75	35	45	18	52		
6,0	12,5			190	80	55	50	75	35	45	18	52		
12,5	100,0			190	80	55	50	75	35	45	17*	52		
H112	≥ 6,0		12,5	210	140	65	55	80	35	50	12	62		
	12,5		25,0	200	120	60	50	75	35	45	10*	58		
	25,0		40,0	190	80	55	50	75	35	45	12*	52		
	40,0		80,0	190	80	55	50	75	35	45	14*	52		
	H12	0,2	0,5	220	170	65	55	85	40	50	4	66		
		0,5	1,5	220	170	65	55	85	40	50	5	66		
1,5		3,0	220	170	65	55	85	40	50	6	66			
3,0		6,0	220	170	65	55	85	40	50	7	66			
6,0		12,5	220	170	65	55	85	40	50	9	66			
12,5		40,0	220	170	65	55	85	40	50	9*	66			
H14	0,2	0,5	240	190	70	60	90	40	55	3	72			
	0,5	1,5	240	190	70	60	90	40	55	3	72			
	1,5	3,0	240	190	70	60	90	40	55	4	72			
	3,0	6,0	240	190	70	60	90	40	55	4	72			
	6,0	12,5	240	190	70	60	90	40	55	5	72			
	12,5	25,0	240	190	70	60	90	40	55	6*	72			
H16	0,2	0,5	265	220	80	65	100	45	60	2	80			
	0,5	1,5	265	220	80	65	100	45	60	3	80			
	1,5	3,0	265	220	80	65	100	45	60	3	80			
	3,0	6,0	265	220	80	65	100	45	60	3	80			
H18	0,2	0,5	290	250	85	70	105	50	65	1	88			
	0,5	1,5	290	250	85	70	105	50	65	2	88			
	1,5	3,0	290	250	85	70	105	50	65	2	88			
H22/H32	0,2	0,5	220	130	65	55	85	40	50	7	63			
	0,5	1,5	220	130	65	55	85	40	50	8	63			
	1,5	3,0	220	130	65	55	85	40	50	10	63			
	3,0	6,0	220	130	65	55	85	40	50	11	63			
	6,0	12,5	220	130	65	55	85	40	50	10	63			
	12,5	40,0	220	130	65	55	85	40	50	9*	63			
H24/H34	0,2	0,5	240	160	70	60	90	40	55	6	70			
	0,5	1,5	240	160	70	60	90	40	55	6	70			
	1,5	3,0	240	160	70	60	90	40	55	7	70			
	3,0	6,0	240	160	70	60	90	40	55	8	70			
	6,0	12,5	240	160	70	60	90	40	55	10	70			
	12,5	25,0	240	160	70	60	90	40	55	8*	70			
H26/H36	0,2	0,5	265	190	80	65	100	45	60	4	78			
	0,5	1,5	265	190	80	65	100	45	60	4	78			
	1,5	3,0	265	190	80	65	100	45	60	5	78			
	3,0	6,0	265	190	80	65	100	45	60	6	78			
H28/H38	0,2	0,5	290	230	85	70	105	50	65	3	87			
	0,5	1,5	290	230	85	70	105	50	65	3	87			
	1,5	3,0	290	230	85	70	105	50	65	4	87			

Tabelle 31: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 2⁸⁰⁸⁰ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.124

Tabelle 5.1.16 Fortsetzung 2 von 7

Werkstoff	Zustand	Nennstärke in mm über bis		R _m	R _e	σ _{0,2}	σ _{0,1}	σ _{0,01}	T _{0,2}	T _{0,1}	A ⁹¹ %	Härte HB
EN AW-5052 Al Mg2,5	O/H11	0,2	0,5	170	65	50	45	65	30	40	12	47
		0,5	1,5	170	65	50	45	65	30	40	14	47
		1,5	3,0	170	65	50	45	65	30	40	16	47
		3,0	6,0	170	65	50	45	65	30	40	18	47
		6,0	12,5	165	65	50	45	65	30	40	19	46
		12,5	80,0	165	65	50	45	65	30	40	18*	46
	H112	≥ 6,0	12,5	190	110	55	50	75	30	45	7	55
		12,5	40,0	170	70	50	45	65	30	40	10*	47
		40,0	80,0	170	70	50	45	65	30	40	14*	47
	H12	0,2	0,5	210	160	65	55	80	35	50	4	63
		0,5	1,5	210	160	65	55	80	35	50	5	63
		1,5	3,0	210	160	65	55	80	35	50	6	63
		3,0	6,0	210	160	65	55	80	35	50	8	63
		6,0	12,5	210	160	65	55	80	35	50	10	63
		12,5	40,0	210	160	65	55	80	35	50	9*	63
	H14	0,2	0,5	230	180	70	60	85	40	55	3	69
		0,5	1,5	230	180	70	60	85	40	55	3	69
		1,5	3,0	230	180	70	60	85	40	55	4	69
		3,0	6,0	230	180	70	60	85	40	55	4	69
		6,0	12,5	230	180	70	60	85	40	55	5	69
		12,5	25,0	230	180	70	60	85	40	55	4*	69
	H16	0,2	0,5	250	210	75	60	95	45	55	2	76
		0,5	1,5	250	210	75	60	95	45	55	3	76
		1,5	3,0	250	210	75	60	95	45	55	3	76
		3,0	6,0	250	210	75	60	95	45	55	3	76
	H18	0,2	0,5	270	240	80	65	100	45	60	1	83
		0,5	1,5	270	240	80	65	100	45	60	2	83
		1,5	3,0	270	240	80	65	100	45	60	2	83
		3,0	6,0	270	240	80	65	100	45	60	2	83
	H22/H32	0,2	0,5	210	130	65	55	80	35	50	5	61
		0,5	1,5	210	130	65	55	80	35	50	6	61
		1,5	3,0	210	130	65	55	80	35	50	7	61
		3,0	6,0	210	130	65	55	80	35	50	10	61
		6,0	12,5	210	130	65	55	80	35	50	12	61
		12,5	40,0	210	130	65	55	80	35	50	12*	61
	H24/H34	0,2	0,5	230	150	70	60	85	40	55	4	67
		0,5	1,5	230	150	70	60	85	40	55	5	67
		1,5	3,0	230	150	70	60	85	40	55	6	67
		3,0	6,0	230	150	70	60	85	40	55	7	67
		6,0	12,5	230	150	70	60	85	40	55	9	67
		12,5	25,0	230	150	70	60	85	40	55	9*	67
	H26/H36	0,2	0,5	250	180	75	60	95	45	55	3	74
		0,5	1,5	250	180	75	60	95	45	55	4	74
		1,5	3,0	250	180	75	60	95	45	55	5	74
		3,0	6,0	250	180	75	60	95	45	55	6	74
	H28/H38	0,2	0,5	270	210	80	65	100	45	60	3	81
		0,5	1,5	270	210	80	65	100	45	60	3	81
		1,5	3,0	270	210	80	65	100	45	60	4	81
EN AW-5251 Al Mg2	O/H11	0,2	0,5	160	60	50	45	65	30	40	13	44
		0,5	1,5	160	60	50	45	65	30	40	14	44
		1,5	3,0	160	60	50	45	65	30	40	16	44
		3,0	6,0	160	60	50	45	65	30	40	18	44
		6,0	12,5	160	60	50	45	65	30	40	18	44
		12,5	50,0	160	60	50	45	65	30	40	18*	44
	H12	0,2	0,5	190	150	60	50	75	35	45	3	58
		0,5	1,5	190	150	60	50	75	35	45	4	58
		1,5	3,0	190	150	60	50	75	35	45	5	58
		3,0	6,0	190	150	60	50	75	35	45	8	58
		6,0	12,5	190	150	60	50	75	35	45	10	58
		12,5	25,0	190	150	60	50	75	35	45	10*	58
	H14	0,2	0,5	210	170	65	55	80	35	50	2	64
		0,5	1,5	210	170	65	55	80	35	50	2	64
		1,5	3,0	210	170	65	55	80	35	50	3	64
		3,0	6,0	210	170	65	55	80	35	50	4	64
		6,0	12,5	210	170	65	55	80	35	50	5	64
		12,5	25,0	210	170	65	55	80	35	50	5	64
	H16	0,2	0,5	230	200	70	60	85	40	55	1	71
		0,5	1,5	230	200	70	60	85	40	55	2	71

Tabelle 32: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 3⁸¹⁸¹ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.125

Tabelle 5.1.16 Fortsetzung 3 von 7

Werkstoff	Zustand	Nennstärke in mm		R ₀	R _c	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,1}	T _{0,2}	T _{0,1}	A ¹⁰⁰ %	Härte HB
nach Al Mg2	H16	1,5	3,0	230	200	70	60	85	40	55	3	71
		3,0	4,0	230	200	70	60	85	40	55	3	71
	H18	0,2	0,5	255	230	75	65	95	45	60	1	79
		0,5	1,5	255	230	75	65	95	45	60	2	79
		1,5	3,0	255	230	75	65	95	45	60	2	79
	H22/H32	0,2	0,5	190	120	55	50	75	35	45	4	56
		0,5	1,5	190	120	55	50	75	35	45	6	56
		1,5	3,0	190	120	55	50	75	35	45	8	56
		3,0	6,0	190	120	55	50	75	35	45	10	56
		6,0	12,5	190	120	55	50	75	35	45	12	56
	H24/H34	0,2	0,5	210	140	65	55	80	35	50	3	62
		0,5	1,5	210	140	65	55	80	35	50	5	62
		1,5	3,0	210	140	65	55	80	35	50	6	62
		3,0	6,0	210	140	65	55	80	35	50	8	62
	H26/H36	0,2	0,5	230	170	70	60	85	40	55	3	69
		0,5	1,5	230	170	70	60	85	40	55	4	69
		1,5	3,0	230	170	70	60	85	40	55	5	69
		3,0	4,0	230	170	70	60	85	40	55	7	69
	H28/H38	0,2	0,5	255	200	75	65	95	45	60	2	77
		0,5	1,5	255	200	75	65	95	45	60	3	77
		1,5	3,0	255	200	75	65	95	45	60	3	77
EN AW-5154A Al Mg3,5(A)	O/H11	0,2	0,5	215	85	65	55	80	35	50	12	58
		0,5	1,5	215	85	65	55	80	35	50	13	58
		1,5	3,0	215	85	65	55	80	35	50	15	58
		3,0	6,0	215	85	65	55	80	35	50	17	58
		6,0	12,5	215	85	65	55	80	35	50	18	58
	H12	12,5	50,0	215	85	65	55	80	35	50	16*	58
		≥ 6,0	12,5	220	125	65	55	85	40	50	8	63
		12,5	40,0	215	90	65	55	80	35	50	9	59
	H12	40,0	80,0	215	90	65	55	80	35	50	13*	59
		0,2	0,5	250	190	75	60	95	45	55	3	75
		0,5	1,5	250	190	75	60	95	45	55	4	75
		1,5	3,0	250	190	75	60	95	45	55	5	75
		3,0	6,0	250	190	75	60	95	45	55	6	75
	H14	6,0	12,5	250	190	75	60	95	45	55	7	75
		12,5	40,0	250	190	75	60	95	45	55	6*	75
		0,2	0,5	270	220	80	65	100	45	60	2	81
		0,5	1,5	270	220	80	65	100	45	60	3	81
		1,5	3,0	270	220	80	65	100	45	60	3	81
	H18	3,0	6,0	270	220	80	65	100	45	60	4	81
		6,0	12,5	270	220	80	65	100	45	60	5	81
		12,5	25,0	270	220	80	65	100	45	60	4*	81
		0,2	0,5	310	270	95	75	110	55	70	1	94
		0,5	1,5	310	270	95	75	110	55	70	1	94
	H19	1,5	3,0	310	270	95	75	110	55	70	1	94
		0,2	0,5	330	285	100	75	120	55	75	1	100
		0,5	1,5	330	285	100	75	120	55	75	1	100
	H22/H32	0,2	0,5	250	180	75	60	95	45	55	5	74
		0,5	1,5	250	180	75	60	95	45	55	6	74
		1,5	3,0	250	180	75	60	95	45	55	7	74
		3,0	6,0	250	180	75	60	95	45	55	8	74
		6,0	12,5	250	180	75	60	95	45	55	10	74
	H24/H34	12,5	40,0	250	180	75	60	95	45	55	9*	74
		0,2	0,5	270	200	80	65	100	45	60	4	80
		0,5	1,5	270	200	80	65	100	45	60	5	80
		1,5	3,0	270	200	80	65	100	45	60	6	80
		3,0	6,0	270	200	80	65	100	45	60	7	80
	H26/H36	6,0	12,5	270	200	80	65	100	45	60	8	80
		12,5	25,0	270	200	80	65	100	45	60	7*	80
		0,2	0,5	290	230	85	70	105	50	65	3	87
		0,5	1,5	290	230	85	70	105	50	65	3	87
	H28/H38	1,5	3,0	290	230	85	70	105	50	65	4	87
		3,0	6,0	290	230	85	70	105	50	65	5	87
		0,2	0,5	310	250	95	75	110	55	70	3	93
		0,5	1,5	310	250	95	75	110	55	70	3	93
		1,5	3,0	310	250	95	75	110	55	70	3	93

Tabelle 33: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 4⁸²⁸² Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.126

Tabelle 5.1.16 Fortsetzung 4 von 7

Werkstoff	Zustand	Nennstärke in mm		R _m	R _e	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,05}	T _{0,2}	ε _{0,2}	A ⁹³ %	Härte HB
EN AW-5454 Al Mg3Mn	O/H111	0,2	0,5	215	85	65	55	80	35	50	12	58
		0,5	1,5	215	85	65	55	80	35	50	13	58
		1,5	3,0	215	85	65	55	80	35	50	15	58
		3,0	6,0	215	85	65	55	80	35	50	17	58
		6,0	12,5	215	85	65	55	80	35	50	18	58
		12,5	80,0	215	85	65	55	80	35	50	16*	58
	H112		12,5	220	125	65	55	85	40	50	8	63
			40,0	215	90	65	55	80	35	50	9*	59
			120,0	215	90	65	55	80	35	50	13*	59
	H12	0,2	0,5	250	190	75	60	95	45	55	3	75
		0,5	1,5	250	190	75	60	95	45	55	4	75
		1,5	3,0	250	190	75	60	95	45	55	5	75
		3,0	6,0	250	190	75	60	95	45	55	6	75
		6,0	12,5	250	190	75	60	95	45	55	7	75
		12,5	40,0	250	190	75	60	95	45	55	6*	75
	H14	0,2	0,5	270	220	80	65	100	45	60	2	81
		0,5	1,5	270	220	80	65	100	45	60	3	81
		1,5	3,0	270	220	80	65	100	45	60	3	81
		3,0	6,0	270	220	80	65	100	45	60	4	81
		6,0	12,5	270	220	80	65	100	45	60	5	81
		12,5	25,0	270	220	80	65	100	45	60	4*	81
	H22/H32	0,2	0,5	250	180	75	60	95	45	55	5	74
		0,5	1,5	250	180	75	60	95	45	55	6	74
		1,5	3,0	250	180	75	60	95	45	55	7	74
		3,0	6,0	250	180	75	60	95	45	55	8	74
		6,0	12,5	250	180	75	60	95	45	55	10	74
		12,5	40,0	250	180	75	60	95	45	55	9*	74
	H24/H34	0,2	0,5	270	200	80	65	100	45	60	4	80
		0,5	1,5	270	200	80	65	100	45	60	5	80
		1,5	3,0	270	200	80	65	100	45	60	6	80
		3,0	6,0	270	200	80	65	100	45	60	7	80
		6,0	12,5	270	200	80	65	100	45	60	8	80
		12,5	25,0	270	200	80	65	100	45	60	7*	80
	H26/H36	0,2	0,5	290	230	85	70	105	50	65	3	87
		0,5	1,5	290	230	85	70	105	50	65	3	87
		1,5	3,0	290	230	85	70	105	50	65	4	87
		3,0	6,0	290	230	85	70	105	50	65	5	87
	H28/H38	0,2	0,5	310	250	95	75	110	55	70	3	93
		0,5	1,5	310	250	95	75	110	55	70	3	93
		1,5	3,0	310	250	95	75	110	55	70	3	93
EN AW-5754 Al Mg3	O/H111	0,2	0,5	190	80	55	50	75	35	45	12	52
		0,5	1,5	190	80	55	50	75	35	45	14	52
		1,5	3,0	190	80	55	50	75	35	45	16	52
		3,0	6,0	190	80	55	50	75	35	45	18	52
		6,0	12,5	190	80	55	50	75	35	45	18	52
		12,5	100,0	190	80	55	50	75	35	45	17*	52
	H112	≥ 6,0	12,5	210	140	65	55	80	35	50	12	62
		12,5	25,0	200	120	60	50	75	35	45	10*	58
		25,0	40,0	190	80	55	50	75	30	45	12*	52
		40,0	80,0	190	80	55	50	75	30	45	14*	52
	H12	0,2	0,5	220	170	65	55	85	40	50	4	66
		0,5	1,5	220	170	65	55	85	40	50	5	66
		1,5	3,0	220	170	65	55	85	40	50	6	66
		3,0	6,0	220	170	65	55	85	40	50	7	66
		6,0	12,5	220	170	65	55	85	40	50	9	66
		12,5	40,0	220	170	65	55	85	40	50	9*	66
	H14	0,2	0,5	240	190	70	60	90	40	55	3	72
		0,5	1,5	240	190	70	60	90	40	55	3	72
		1,5	3,0	240	190	70	60	90	40	55	4	72
		3,0	6,0	240	190	70	60	90	40	55	4	72
		6,0	12,5	240	190	70	60	90	40	55	5	72
		12,5	25,0	240	190	70	60	90	40	55	5*	72
	H16	0,2	0,5	265	220	80	65	100	45	60	2	80
		0,5	1,5	265	220	80	65	100	45	60	3	80
		1,5	3,0	265	220	80	65	100	45	60	3	80
		3,0	6,0	265	220	80	65	100	45	60	3	80
	H18	0,2	0,5	290	250	85	70	105	50	65	1	88
		0,5	1,5	290	250	85	70	105	50	65	2	88
		1,5	3,0	290	250	85	70	105	50	65	2	88

Tabelle 34: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 5⁸³⁸³ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.127

Tabelle 5.1.16 Fortsetzung 6 von 7

Werkstoff	Zustand	Nennstärke in mm		R _m	R _e	σ _{W,02}	σ _{W,0,02}	σ _{W,0,1}	T _{W,0}	τ _{W,0}	A ⁺¹ %	Härte HB
		über	bis									
nach EN AW-5083	H26/H36	0,2	0,5	360	280	110	80	130	60	80	2	106
		0,5	1,5	360	280	110	80	130	60	80	3	106
		1,5	3,0	360	280	110	80	130	60	80	3	106
		3,0	4,0	360	280	110	80	130	60	80	3	106
Al Mg4,5Mn0,7	O/H11	0,2	0,5	240	100	70	60	90	40	55	11	65
		0,5	1,5	240	100	70	60	90	40	55	12	65
		1,5	3,0	240	100	70	60	90	40	55	13	65
		3,0	6,0	240	100	70	60	90	40	55	15	65
Al Mg 4	O/H11	6,0	12,5	240	100	70	60	90	40	55	17	65
		12,5	150,0	240	100	70	60	90	40	55	16*	65
	H112	≥ 6,0	12,5	250	125	75	60	95	45	55	8	69
		12,5	40,0	240	105	70	60	90	40	55	9*	65
		40,0	80,0	240	100	70	60	90	40	55	12*	65
	H116	≥ 1,5	3,0	275	195	85	65	100	50	60	8	81
		3,0	6,0	275	195	85	65	100	50	60	9	81
		6,0	12,5	275	195	85	65	100	50	60	10	81
		12,5	50,0	275	195	85	65	100	50	60	9*	81
	H12	0,2	0,5	275	200	85	65	100	50	60	3	81
		0,5	1,5	275	200	85	65	100	50	60	4	81
		1,5	3,0	275	200	85	65	100	50	60	5	81
		3,0	6,0	275	200	85	65	100	50	60	6	81
		6,0	12,5	275	200	85	65	100	50	60	7	81
		12,5	40,0	275	200	85	65	100	50	60	6*	81
	H14	0,2	0,5	300	240	90	70	110	50	65	2	90
		0,5	1,5	300	240	90	70	110	50	65	3	90
		1,5	3,0	300	240	90	70	110	50	65	3	90
		3,0	6,0	300	240	90	70	110	50	65	3	90
		6,0	12,5	300	240	90	70	110	50	65	4	90
		12,5	25,0	300	240	90	70	110	50	65	3*	90
	H16	0,2	0,5	325	270	100	75	120	55	70	1	98
		0,5	1,5	325	270	100	75	120	55	70	2	98
		1,5	3,0	325	270	100	75	120	55	70	2	98
		3,0	4,0	325	270	100	75	120	55	70	2	98
	H18	0,2	0,5	345	290	105	80	125	60	75	1	104
		0,5	1,5	345	290	105	80	125	60	75	1	104
		1,5	3,0	345	290	105	80	125	60	75	1	104
	H22/H32	0,2	0,5	275	185	85	65	100	50	60	5	80
		0,5	1,5	275	185	85	65	100	50	60	6	80
		1,5	3,0	275	185	85	65	100	50	60	7	80
		3,0	6,0	275	185	85	65	100	50	60	8	80
		6,0	12,5	275	185	85	65	100	50	60	10	80
		12,5	40,0	275	185	85	65	100	50	60	9*	80
	H24/H34	0,2	0,5	300	220	90	70	110	50	65	4	88
		0,5	1,5	300	220	90	70	110	50	65	5	88
		1,5	3,0	300	220	90	70	110	50	65	6	88
		3,0	6,0	300	220	90	70	110	50	65	7	88
		6,0	12,5	300	220	90	70	110	50	65	8	88
		12,5	25,0	300	220	90	70	110	50	65	7*	88
	H26/H36	0,2	0,5	325	250	100	75	115	55	70	2	96
		0,5	1,5	325	250	100	75	115	55	70	3	96
		1,5	3,0	325	250	100	75	115	55	70	3	96
		3,0	4,0	325	250	100	75	115	55	70	3	96
EN AW-6082 Al SiMgMn	T4	≥ 0,4	1,5	205	110	60	55	80	35	50	12	58
		1,5	3,0	205	110	60	55	80	35	50	14	58
		3,0	6,0	205	110	60	55	80	35	50	15	58
		6,0	12,5	205	110	60	55	80	35	50	14	58
	T451	12,5	40,0	205	110	60	55	80	35	50	13*	58
		40,0	80,0	205	110	60	55	80	35	50	12*	58
	T42	≥ 0,4	1,5	205	95	60	55	80	35	50	12	57
		1,5	3,0	205	95	60	55	80	35	50	14	57
		3,0	6,0	205	95	60	55	80	35	50	15	57
		6,0	12,5	205	95	60	55	80	35	50	14	57
		12,5	40,0	205	95	60	55	80	35	50	13*	57
		40,0	80,0	205	95	60	55	80	35	50	12*	57
	T6	≥ 0,4	1,5	310	260	95	75	110	55	70	6	94
		1,5	3,0	310	260	95	75	110	55	70	7	94
		3,0	6,0	310	260	95	75	110	55	70	10	94
		6,0	12,5	310	260	95	75	110	55	70	9	91

Tabelle 36: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 7⁸⁵⁸⁵ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.129

Tabelle 5.1, 16 Fortsetzung 7 von 7

Werkstoff	Zustand	Nennstärke in mm		R_{m0}	R_{m0}	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2}$	$T_{0,2}$	$T_{0,2}$	A^{+1}	Härte
		über	bis									
noch EN AW-6082 AlSiMgMn	T651	12,5	60,0	295	240	90	70	110	50	65	8*	89
	T62	60,0	100,0	295	240	90	70	110	50	65	7*	89
		100,0	150,0	275	240	85	65	100	50	60	6*	84
		150,0	175,0	275	230	85	65	100	50	60	4*	83
	T61	≥0,4	1,5	280	205	85	70	105	50	65	10	82
	T6151	1,5	3,0	280	205	85	70	105	50	65	11	82
		3,0	6,0	280	205	85	70	105	50	65	11	82
		6,0	12,5	280	205	85	70	105	50	65	12	82
	T6151	12,5	60,0	275	200	85	65	100	50	60	12*	81
		60,0	100,0	275	200	85	65	100	50	60	10*	81
EN AW-7020 AlZn4,5MgZr	T4	≥0,4	1,5	320	210	95	75	115	55	70	11	92
	T451	1,5	3,0	320	210	95	75	115	55	70	12	92
		3,0	6,0	320	210	95	75	115	55	70	13	92
		6,0	12,5	320	210	95	75	115	55	70	14	92
	T6	≥0,4	1,5	350	280	105	80	125	60	75	7	104
	T651	1,5	3,0	350	280	105	80	125	60	75	8	104
	T62	3,0	6,0	350	280	105	80	125	60	75	10	104
		6,0	12,5	350	280	105	80	125	60	75	10	104
	T651	12,5	40,0	350	280	105	80	125	60	75	9*	104
		40,0	100,0	340	270	100	80	120	60	75	8*	101
EN AW-7021 AlZn5,5MgZr	T6	≥1,5	3,0	400	350	120	90	140	70	85	7	121
		3,0	6,0	400	350	120	90	140	70	85	8	121
	T6	≥3,0	12,5	450	370	135	95	155	80	95	8	133
	T6	12,5	25,0	450	370	135	95	155	80	95	8*	133
	T651	25,0	50,0	450	370	135	95	155	80	95	7*	133
		50,0	100,0	430	350	130	90	150	75	95	5*	127
		100,0	200,0	410	330	125	90	145	70	90	3*	121
	T6	≥0,4	0,8	525	460	160	105	175	90	110	6	157
	T651	0,8	1,5	540	460	160	110	180	95	115	6	160
	T62	1,5	3,0	540	470	160	110	180	95	115	7	161
EN AW-7075 AlZn5,5MgCu		3,0	6,0	545	475	165	110	180	95	115	8	163
		6,0	12,5	540	460	160	110	180	95	115	8	160
	T651	12,5	25,0	540	470	160	110	180	95	115	6*	161
	T62	25,0	50,0	530	460	160	105	180	90	110	5*	158
		50,0	60,0	525	440	160	105	175	90	110	4*	155
		60,0	80,0	495	420	150	100	170	85	105	4*	147
		80,0	90,0	490	390	145	100	165	85	105	4*	144
		90,0	100,0	460	360	140	95	160	80	100	3*	135
		100,0	120,0	410	300	125	90	145	70	90	2*	119
		120,0	150,0	360	260	110	80	130	60	80	2*	104
T76 T7651 T73 T7351 T7351	T76	≥1,5	3,0	500	425	150	105	170	85	105	7	149
	T7651	3,0	6,0	500	425	150	105	170	85	105	8	149
		6,0	12,5	490	415	145	100	165	85	105	7	146
	T73	≥1,5	3,0	460	385	140	95	160	80	100	7	137
	T7351	3,0	6,0	460	385	140	95	160	80	100	8	137
		6,0	12,5	475	390	145	100	160	80	100	7	140
	T7351	12,5	25,0	475	390	145	100	160	80	100	6*	140
		25,0	50,0	475	390	145	100	160	80	100	5*	140
		50,0	60,0	455	360	135	95	155	80	95	5*	133
		60,0	80,0	440	340	130	95	150	75	95	5*	129
		80,0	100,0	430	340	130	95	150	75	95	5*	126

Tabelle 37: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 8⁸⁶⁸⁶ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.130

Tabelle 5.1.17 Festigkeitskennwerte in MPa für Aluminiumknetwerkstoff, Gezogene Stangen und Rohre nach DIN EN 754-2 (Juni 2008)

Werkstoff, chem. Zusam- mensetzung, DIN-Nr.	Zustand	Stangen D; S ¹ [mm]		Rohre e ² [mm]		R _m	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,05}	σ _{0,1}	T _{0,2}	A %	A ₅₀ %
		von	bis	von	bis									
EN AW-2007 AlCu4PbMgMn 3.1645	T3	-	30	-	-	370	240	110	85	130	65	80	7	5
		30	80	-	-	340	220	100	80	120	60	75	6	-
		-	-	-	20	370	250	110	85	130	65	80	7	5
	T351	-	80	-	-	370	240	110	85	130	65	80	5	3
	T3510 T3511	-	-	-	20	370	240	110	85	130	65	80	5	3
EN AW-2011 AlCu6BiPb 3.1655	T3	-	40	-	-	320	270	95	75	115	55	70	10	8
		40	50	-	-	300	250	90	70	110	50	70	10	-
		50	80	-	-	280	210	85	70	105	50	65	10	-
		-	-	-	5	310	260	95	75	110	55	70	10	8
	EN AW-2011A AlCu6BiPb(A)	-	-	-	5	290	240	85	70	105	50	65	8	6
EN AW-2014 AlCu4SiMg 3.1255	T3	-	80	-	-	370	270	110	85	130	65	80	8	8
		-	-	-	20	370	275	110	85	130	65	80	8	6
		-	80	-	-	< 240	< 125	70	60	90	40	55	12	10
		-	80	-	20	380	290	115	85	135	65	85	8	6
	T351 T3510 T3511	-	80	-	-	380	290	115	85	135	65	85	6	4
EN AW-2014A AlCu4SiMg(A)	T4	-	80	-	-	380	220	115	85	135	65	85	12	10
		-	-	-	20	380	240	115	85	135	65	85	12	10
		-	80	-	-	380	220	115	85	135	65	85	10	8
		-	-	-	20	380	240	115	85	135	65	85	10	8
	T6	-	80	-	-	450	380	135	95	155	80	95	8	6
		-	80	-	-	450	380	135	95	155	80	95	6	4
		-	-	-	20	450	380	135	95	155	80	95	6	4
		-	-	-	20	450	380	135	95	155	80	95	6	4
EN AW-2017A AlCu4MgSi(A) 3.1325	T3	-	80	-	-	< 240	< 125	< 70	< 60	< 90	40	55	12	10
		-	80	-	20	400	250	120	90	140	70	85	10	8
		-	80	-	-	400	250	120	90	140	70	85	8	6
		-	-	-	20	400	250	120	90	140	70	85	8	6
	T3511	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EN AW-2024 AlCu4Mg 3.1355	T3	-	80	-	-	< 250	< 150	< 75	< 60	< 90	< 45	< 55	12	10
		-	-	-	20	< 240	< 140	< 70	< 60	> 90	< 40	< 55	12	10
		-	10	-	-	425	310	130	90	145	75	90	10	8
		-	80	-	-	425	290	130	90	145	75	90	9	7
	T351	-	-	-	5	440	290	130	95	150	75	95	10	8
		-	-	-	5	440	290	130	95	150	75	95	10	8
		-	-	-	20	420	270	125	90	145	75	90	10	8
		-	80	-	-	425	310	130	90	145	75	90	8	6
	T3510 T3511	-	-	-	20	420	290	125	90	145	75	90	8	6
	T6	-	80	-	-	425	315	130	90	145	75	90	5	4
		-	80	-	-	425	315	130	90	145	75	90	4	3
		-	80	-	-	455	400	135	95	155	80	95	4	3
		-	80	-	-	455	400	135	95	155	80	95	3	2
EN AW-2030 AlCu4PbMg	T3	-	30	-	-	370	240	110	85	130	65	80	7	5
		30	80	-	-	340	220	100	80	120	60	75	6	-
	T351	-	80	-	-	370	240	110	85	130	65	80	5	3
	T3510 T3511	-	-	-	20	370	240	110	85	130	65	80	5	3
EN AW-3003 AlMn1Cu 3.0517	T3	-	80	-	-	95	35	30	25	40	15	25	25	16
		-	-	-	20	95	35	30	25	40	15	25	25	10
	H14	(D)	40	-	10	130	110	40	35	50	25	30	6	4
		(S)	10	-	-	130	110	40	35	50	25	30	6	4
	H16	(D)	15	-	5	160	130	50	45	65	30	40	4	3
		(S)	5	-	-	160	130	50	45	65	30	40	4	3
	H18	(D)	10	-	3	180	145	55	45	70	30	40	3	2
		(S)	3	-	-	180	145	55	45	70	30	40	3	2

¹ Rundstange: Durchmesser D; Vierkant-, Sechskantstange: Schlüsselweite S; Rechteckstange: Dicke S; Rohr: Wanddicke e.
² Für die Berechnung ist die Bruchdehnung A anzuwenden.

Tabelle 38: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 9⁸⁷

⁸⁷ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.131

Tabelle 5.1.17 Fortsetzung 1 von 2

Werkstoff, chem. Zusam- mensetzung DIN-Nr.	Zustand	Stangen D; S ¹⁾ [mm]		Rohre e ¹⁾ [mm]		R _m	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,9}	ε _W	T ₀₁	A %	A ₅₀ %
		von	bis	von	bis									
EN AW-3103 AlMn1 3.0515	0, H111	(D) (S)	80 60	- -	20 -	95 95	35 35	30 30	25 25	40 40	15 15	25 25	25 25	20 20
	H14	(D) (S)	40 10	- -	10 -	130 130	110 110	40 40	35 35	50 50	25 25	30 30	6 6	4 4
	H16	(D) (S)	15 5	- -	5 -	160 160	130 130	50 50	45 45	65 65	30 30	40 40	4 4	3 3
	H18	(D) (S)	10 3	- -	3 -	180 180	145 145	55 55	45 45	70 70	30 30	40 40	3 3	2 2
EN AW-5005 AlMg1(B) EN AW-5005A AlMg1(C) 3.3315	0, H111	(D) (S)	80 60	- -	20 -	100 100	40 40	30 30	30 30	40 40	17 17	25 25	18 18	16 16
	H14	(D) (S)	40 10	- -	5 -	140 140	110 110	40 40	40 40	55 55	25 25	35 35	6 6	4 4
	H18	(D) (S)	15 2	- -	3 -	185 185	155 155	55 55	50 50	70 70	30 30	45 45	4 4	2 2
EN AW-5019 AlMg5 3.3535	0, H111	(D) (S)	80 60	- -	20 -	230 230	110 110	75 75	60 60	95 95	45 45	55 55	16 16	14 14
	H12, H22, H32	(D) (S)	40 25	- -	10 -	270 270	180 180	80 80	65 65	100 100	45 45	60 60	8 8	7 7
	H14, H24, H34	(D) (S)	25 10	- -	- -	300 300	210 210	90 90	70 70	110 110	50 50	65 65	4 4	3 3
	H16, H26, H36	(D) (S)	- -	- -	5 -	300 300	220 220	90 90	70 70	110 110	50 50	65 65	4 4	3 3
EN AW-5251 AlMg2 3.3525	0, H111	(D) (S)	80 60	- -	20 -	150 150	60 60	45 45	40 40	60 60	25 25	35 35	17 17	15 15
	H12, H22, H32	(D) (S)	- -	- -	10 -	180 180	110 110	55 55	45 45	70 70	30 30	40 40	5 5	4 4
	H14, H24, H34	(D) (S)	30 5	- -	- -	200 200	160 160	60 60	50 50	75 75	35 35	45 45	5 5	4 4
	H16, H26, H36	(D) (S)	- -	- -	5 -	200 200	160 160	60 60	50 50	75 75	35 35	45 45	4 4	3 3
	H18, H28, H38	(D) (S)	20 3	- -	3 -	240 240	200 200	70 70	60 60	90 90	40 40	55 55	2 2	2 2
EN AW-5082 AlMg2,5 3.3523	0, H111	(D) (S)	80 60	- -	20 -	170 170	65 65	50 50	45 45	65 65	30 30	40 40	20 20	17 17
	H12, H22, H32	(D) (S)	40 -	- -	- -	210 -	160 -	65 -	55 -	80 -	35 -	50 -	7 -	5 -
	H14, H24, H34	(D) (S)	25 -	- -	5 -	230 -	180 -	70 -	60 -	85 -	40 -	55 -	5 -	4 -
	H16, H26, H36	(D) (S)	15 -	- -	- -	250 -	200 -	75 -	60 -	95 -	45 -	55 -	3 -	3 -
	H18, H28, H38	(D) (S)	10 -	- -	5 -	270 -	220 -	80 -	65 -	100 -	45 -	60 -	2 -	2 -
EN AW-5154A AlMg3,5(A) EN AW-5754 AlMg3 3.3535	0, H111	(D) (S)	80 60	- -	20 -	200 200	85 85	60 60	50 50	75 75	35 35	45 45	16 16	14 14
	H14, H24, H34	(D) (S)	25 -	- -	10 -	260 -	200 -	80 -	65 -	95 -	45 -	60 -	5 -	4 -
	H18, H28, H38	(D) (S)	10 -	- -	5 -	310 -	240 -	95 -	75 -	110 -	55 -	70 -	3 -	2 -
EN AW-5083 AlMg4,5Mn0,7 3.3547	0, H111	(D) (S)	80 60	- -	20 -	270 270	110 110	80 80	65 65	100 100	45 45	60 60	16 16	14 14
	H12, H22, H32	(D) (S)	30 -	- -	10 -	280 -	200 -	85 -	70 -	105 -	50 -	65 -	6 -	4 -
	H14, H24, H34	- -	- -	- -	5 -	300 -	235 -	90 -	70 -	110 -	50 -	65 -	4 -	3 -

Tabelle 39: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 10⁸⁸⁸⁸ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.132

Tabelle 5.1.17 Fortsetzung 2 von 2

Werkstoff, chem. Zusam- mensetzung DIN-Nr.	Zustand	Stangen D; S ⁹⁹ [mm]		Rohre e ⁹⁹ [mm]		R _m	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,05}	T _{0,2}	T _{0,01}	T _{0,05}	A ₅ %	A ₈₀ %
		von	bis	von	bis										
EN AW-2086 AlMg4 3.3545	0, H111	(D)	80	-	20	240	95	70	60	90	40	55	16	14	
		(S)	60	-	-	240	95	70	60	90	40	55	16	14	
	H12, H22, H32	(D)	30	-	10	270	190	80	65	100	45	60	5	4	
		(S)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	H14, H24, H34	-	-	-	5	295	230	90	70	110	50	65	3	2	
EN AW-6012 AlMgSiPb 3.0615	T4	-	80	-	20	200	100	60	50	75	35	45	10	8	
	T6	-	80	-	20	310	260	95	75	110	55	70	8	5	
	T4	-	80	-	-	130	65	40	35	50	25	30	15	13	
		-	-	-	5	130	65	40	35	50	25	30	12	10	
		-	-	5	20	130	65	40	35	50	25	30	15	13	
EN AW-6060 AlMgSi 3.3206	T6	-	80	-	20	215	160	65	55	80	35	50	12	10	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	T4	-	80	-	-	130	65	40	35	50	25	30	15	13	
		-	-	-	5	130	65	40	35	50	25	30	12	10	
		-	-	5	20	130	65	40	35	50	25	30	15	13	
EN AW-6061 AlMg1SiCu 3.3211	T4	-	80	-	20	205	110	60	55	80	35	50	16	14	
	T6	-	80	-	20	290	240	85	70	105	50	65	10	8	
	T6	-	80	-	5	290	240	85	70	105	50	65	10	8	
		-	-	5	20	290	240	85	70	105	50	65	10	8	
	T8	-	50	-	10	345	315	105	80	125	60	75	4	3	
EN AW-6262 AlMg1SiPb 3.3211	T9	-	50	-	10	360	330	110	80	130	60	80	4	3	
	T4	-	80	-	-	150	75	45	40	60	25	35	15	13	
		-	-	-	5	150	75	45	40	60	25	35	12	10	
		-	-	5	20	150	75	45	40	60	25	35	15	13	
	T6	-	80	-	20	220	190	65	55	85	40	50	10	8	
EN AW-6063 AlMg0,7Si 3.3235	T66	-	80	-	20	230	195	70	60	85	40	55	10	8	
	T832	-	-	-	5	275	240	85	65	100	50	60	5	3	
	0, H111	-	80	-	20	< 140	-	< 40	< 40	< 55	< 25	< 35	15	13	
	T4	-	80	-	20	150	90	45	40	60	25	35	16	14	
	T6	-	80	-	20	230	190	70	60	85	40	55	9	7	
EN AW-6082 AlSi1MgMn 3.2315	0, H111	-	80	-	20	< 160	< 110	< 50	< 45	< 65	< 30	< 40	15	13	
	T4	-	80	-	20	205	110	60	55	80	35	50	4	12	
	T6	-	80	-	-	310	255	95	75	110	55	70	10	9	
		-	-	-	5	310	255	95	75	110	55	70	8	7	
		-	-	5	20	310	240	95	75	110	55	70	10	9	
EN AW-7020 AlZn4,5Mg1 3.4335	T6	(D)	80	-	20	350	280	105	80	125	60	75	10	8	
		(S)	50	-	-	350	280	105	80	125	60	75	10	8	
	T6	-	80	-	20	460	380	140	95	155	80	100	8	6	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
EN AW-7049A AlZn8MgCu 3.4345	T6	-	80	-	-	590	500	175	115	195	100	120	7	5	
	T6, T6510, T6511	-	-	-	5	590	530	175	115	195	100	120	6	4	
		-	-	5	20	590	530	175	115	195	100	120	7	5	
	0, H111	-	80	-	20	< 275	< 165	< 85	< 65	< 100	< 50	< 60	10	8	
	T6	-	80	-	20	540	485	160	110	180	95	115	7	6	
EN AW-7075 AlZn5,5MgCu 3.4365	T651	-	80	-	-	540	485	160	110	180	95	115	5	4	
	T6510, T6511	-	-	-	20	540	485	160	110	180	95	115	5	4	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	T73	-	80	-	20	455	385	135	95	155	80	95	10	8	
	T7351	-	80	-	-	455	385	135	95	155	80	95	8	6	
EN AW-7075 AlZn5,5MgCu 3.4365	T73510 T73511	-	-	-	20	455	385	135	95	155	80	95	8	6	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 40: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 11⁸⁹⁸⁹ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.133

Tabelle 5.1.18 Festigkeitskennwerte in MPa für Aluminiumknetwerkstoff, Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile nach DIN EN 755-2 (Juni 2008)

Bezeichnung numerisch EN AW-... DIN- Kurzzeichen DIN-Nummer	Zustand	Stangen D Stangen S Rohre e Profile e ¹⁾ [mm]			R _m	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,05}	σ _{0,9}	σ _{0,95}	A	
		von	bis	%									
EN AW-2007 AlCuMgPb 3.1645	T4 T4510 T4511	D	-	80	370	250	110	85	130	65	80	8	
		S	-	80									
		eR	-	25									
		eP	-	30									
		D	>80	200	340	220	100	80	120	60	75	8	
		S	>80	200									
		eR	-	-									
		eP	-	-									
		D	>200	250	330	210	100	75	120	55	75	7	
		S	>200	250									
		eR	-	-									
		eP	-	-									
EN AW-2011 AlCuBiPb 3.1655	T4 T6	D	-	200	275	125	85	65	100	50	60	14	
		S	-	60									
		eR	-	-									
		eP	-	-									
		D	-	75	310	230	95	75	110	55	70	8	
		S	-	60									
		eR	-	25									
		eP	-	-									
		D	>75	200	295	195	90	70	110	50	65	6	
		S	-	-									
		eR	-	-									
		eP	-	-									
EN AW-2011A -	T4 T6	D	-	200	275	125	85	65	100	50	60	14	
		S	-	60									
		eR	-	-									
		eP	-	-									
		D	-	75	310	230	95	75	110	55	70	8	
		S	-	60									
		eR	-	25									
		eP	-	-									
		D	>75	200	295	195	90	70	110	50	65	6	
		S	-	-									
		eR	-	-									
		eP	-	-									
EN AW-2014 AlCuSiMg 3.1255 und EN AW-2014A -	O H111 T4 T4510 T4511	D	-	200	<250	<135	<75	<60	<95	<45	<55	12	
		S	-	200									
		eR	-	20									
		eP	-	alle									
		D	-	25	370	230	110	85	130	65	80	13	
		S	-	25									
		eR	-	20									
		eP	-	25									
		D	>25	20	410	270	125	90	145	70	90	12	
		S	>25	25									
		eR	>25	75									
		eP	-	75									10
		D	>75	75	390	250	115	85	135	70	85	10	
		S	>75	-									
		eR	-	150									
		eP	-	150									
		D	>150	-	350	230	105	80	125	60	75	8	
		S	>150	-									
		eR	-	-									
		eP	-	-									

¹⁾ Reihenfolge und Bezeichnungen nach DIN EN 755-2, Seite 2.

²⁾ Die Werte „F“ sind nur zur Information.

³⁾ Rundstangen; Durchmesser D. Vier- und Sechskantstangen; Schlüsselweite S. Rechteckstangen; Dicke S. Rohre und Profile; Wanddicke e. „<“ für R_m und R_p bedeutet, dass für R_m und R_p in DIN EN 755-2 nur Maximalwerte angegeben sind. Für den Festigkeitsnachweis sind aber Minimalwerte erforderlich.

⁴⁾ Bruchdehnung bezüglich der Anfangslänge der Proben 5,65 · (Probenfläche)^{1/2}.

⁵⁾ Offen = offenes Profil, hohl = Hohlprofil.

Tabelle 41: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 12⁹⁰

⁹⁰ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.134

Tabelle 5.1.18 Fortsetzung 1 von 9

Bezeichnung numerisch EN AW-... DIN- Kurzzeichen DIN-Nummer 13	Zustand 13	Stangen D Stangen S Rohre e Profile e ¹³ [mm]			R _m 13	R _p 13	$\sigma_{0,02}$ 13	$\sigma_{0,001}$ 13	$\sigma_{0,01}$ 13	T _{0,2} 13	T _{0,01} 13	A 13
		von	his	13								
noch EN AW-2014 AlCuSiFe 3.1255 und EN AW-2014A 3.1255	T6 T6510 T6511	D	-	25	415	370	125	90	145	70	90	6
		S	-	25								7
		eR	-	10								
		eP	-	25								
		D	>25	75	460	415	140	95	160	80	100	7
		S	>25	75								
		eR	-	-								
		eP	>25	75								
		D	>75	150	465	420	140	95	160	80	100	7
		S	>75	150								
		eR	-	-								
		eP	-	-								
EN AW-2017A AlCuMg1 3.1335	O H111 T4 T4510 T4511	D	-	200	<250	<135	<75	<60	<95	<45	<55	12
		S	-	200								
		eR	-	20								
		eP	-	-								
		D	-	25	380	260	115	85	135	65	85	12
		S	-	25								
		eR	-	10								10
		eP	-	20								
		D	>25	75	400	270	120	90	140	70	85	10
		S	>25	75								
		eR	>10	75								
		eP	-	-								
EN AW-2024 AlCuMg2 3.1335	O H111	D	-	200	<250	<150	<75	<60	<95	<45	<55	12
		S	-	200								
		eR	-	30								
		eP	-	alle								
		D	-	25	380	260	115	85	135	65	85	12
		S	-	25								
		eR	-	10								
		eP	-	20								
		D	>25	75	400	270	120	90	140	70	85	10
		S	>25	75								
		eR	>10	75								
		eP	-	-								

¹³ bis ¹³ siehe Seite 134.Tabelle 42: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 13⁹¹⁹¹ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.135

Tabelle 5.1.18 Fortsetzung 2 von 9

Bezeichnung numerisch EN AW-... DIN- Kurzzeichen DIN-Nummer 14	Zustand 92	Stangen D Stangen S Rohre e Profile e ⁹¹ [mm]			R _m 63	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,05}	σ _{0,95}	T _{0,2}	A 96
		von	bis	64								
noch EN AW-2024 AlCuMg ² 3.1355	T3 T3510 T3511	D	-	50	450	310	135	95	155	80	95	8
		S	-	50								
		eR	-	-								
		eP	-	-								
		D	>50	100	440	300	130	95	150	75	95	8
	T8 T8510 T8511	S	>50	100								
		eR	-	-								
		eP	-	-								
		D	>100	200	420	280	125	90	145	75	90	8
		S	>100	200								
EN AW-2030 AlCuMg ² 3.1355	T4 T4510 T4511	eR	-	30								
		eP	-	30								
		D	>80	200	340	220	100	80	120	60	75	8
		S	>80	200								
		eR	-	-								
	T8 T8510 T8511	eP	-	-								
		D	>200	250	330	210	100	75	120	60	75	7
		S	>200	250								
		eR	-	-								
EN AW-3003 AlMnCu 3.0517	F H112 O H111	D	-	alle	95	35	30	25	40	15	25	25
		S	-	alle								
		eR	-	alle								
EN AW-3103 AlMn 3.0515	F H112 O H111	eP	-	alle								
		D	-	alle	95	35	30	25	40	15	25	25
		S	-	alle								
EN AW-5005 AlMg ² 3.1355	F H112	eR	-	alle								
		eP	-	alle								
		D	-	alle	100	40	30	30	40	17	25	18
	O H111	S	-	alle								
		eR	-	alle	100	40	30	30	40	17	25	20
		eP	-	alle								
EN AW-5051A AlMg ² 3.1326	F H112	D	-	alle	150	50	45	40	60	25	35	16
		S	-	alle								
		eR	-	alle	150	60	45	40	60	25	35	16
	O H111	eP	-	alle								
		D	-	alle	150	50	45	40	60	25	35	18
		S	-	alle								
EN AW-5051A AlMg ² 3.1326	O H111	eR	-	alle	150	60	45	40	60	25	35	18
		eP	-	-								
		D	-	-								

⁹¹ bis ⁹⁶ siehe Seite 134Tabelle 43: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 14⁹²⁹² Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.136

Tabelle 5.1.18 Fortsetzung 3 von 9

Bezeichnung numerisch EN AW-... <i>DIN-</i> <i>Kurzzeichen,</i> <i>DIN-Nummer</i> <i>13</i>	Zustand <i>14</i>	Stangen <i>D</i> Stangen <i>S</i> Rohre <i>e</i> Profile <i>e</i> ¹³ [mm]			<i>R_m</i> <i>14</i>	<i>R_p</i>	<i>σ_{W,20}</i>	<i>σ_{S,20+10}</i>	<i>σ_{W,p}</i>	<i>T_{0,2}</i>	<i>T_{0,1}</i>	<i>A</i> <i>15</i>
			von	bis								
EN AW-5251 AlMg2Mn0,3 3.3525	F H112	<i>D</i>	-	alle	160	60	50	45	65	30	40	16
		<i>S</i>	-	alle								
		<i>eR</i>	-	alle								
	O H111	<i>D</i>	-	alle	160	60	50	45	65	30	40	17
EN AW-5052 AlMg2,5 3.3533	F H112	<i>D</i>	-	alle	170	70	50	45	65	30	40	15
		<i>S</i>	-	alle								
		<i>eR</i>	-	alle								
	O H111	<i>D</i>	-	alle	170	70	50	45	65	30	40	17
EN AW-5154A - -	F H112	<i>D</i>	-	200	200	85	60	50	75	35	45	16
		<i>S</i>	-	200								
		<i>eR</i>	-	25								
	O H111	<i>D</i>	-	200	200	85	60	50	75	35	45	18
EN AW-5454 AlMg2,7Mn 3.3537	F H112	<i>D</i>	-	200	200	85	60	50	75	35	45	16
		<i>S</i>	-	200								
		<i>eR</i>	-	25								
	O H111	<i>D</i>	-	200	200	85	60	50	75	35	45	18
EN AW-5754A AlMg3 3.3535	F H112	<i>D</i>	-	150	180	80	55	45	70	30	40	14
		<i>S</i>	-	150								
		<i>eR</i>	-	25								
		<i>eP</i>	-	25								
		<i>D</i>	>150	250	180	70	55	45	70	30	40	13
		<i>S</i>	>150	250								
EN AW-5019 AlMg5 3.3535	F H112	<i>D</i>	-	200	250	110	75	60	95	45	55	14
		<i>S</i>	-	200								
		<i>eR</i>	-	30								
	O H111	<i>D</i>	-	200	250	110	75	60	95	45	55	15
EN AW-5083 AlMg4,5Mn 3.3547	F O H111	<i>D</i>	-	200	270	110	80	65	100	45	60	12
		<i>S</i>	-	200								
		<i>eR</i>	-	alle								
		<i>eP</i>	-	alle								
		<i>D</i>	>200	250	260	100	80	65	95	45	60	12
		<i>S</i>	>200	250								
EN AW-5083 AlMg4,5Mn 3.3547	F O H111	<i>D</i>	-	200	270	125	80	65	100	45	60	12
		<i>S</i>	-	200								
		<i>eR</i>	-	alle								
	O H111	<i>D</i>	-	alle								

Tabelle 44: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 14⁹³⁹³ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.137

Tabelle 5.1.18 Fortsetzung 4 von 9

Bezeichnung numerisch EN AW-... DIN- Kurzzeichen, DIN-Nummer 15	Zustand 22	Stangen D Stangen S Rohre e Profile e ¹⁾ [mm]			R _m 24	R _p	σ _{YS}	σ _{YS,red}	σ _{YS,9}	E _{0,2}	E _{0,1}	A ₅ 11
		von	bis									
EN AW-5086 AlMg4Mn 3.3543	F H112	D	-	250	240	95	70	60	90	40	55	12
		S	-	250								
		eR	-	alle								
	O H111	D	-	200	240	95	70	60	90	40	55	18
EN AW-6101A - -	T6	D	-	150	200	170	60	50	75	35	45	10
		S	-	150								
		eR	-	alle								
EN AW-6101B E-AlMgSi0,5 3.3207	T6	D	-	15	215	160	65	55	80	35	50	8
		S	-	15								
		eR	-	15								
		eP	-	15								
	T7	D	-	15	170	120	50	45	65	30	40	12
		S	-	15								
EN AW-6005 - -	T6	D	-	25	270	225	80	65	100	45	60	10
		S	-	25								
		eR	-	5								
		eP	-	-								
		D	>25	50	270	225	80	65	100	45	60	8
		S	>25	50								
		eR	-	5								
		eP	-	-								
		D	>50	100	260	215	80	65	95	45	60	8
		S	>50	100								
		eR	>5	10								
		eP	-	-								
	T4 offen	eP	-	25	180	90	55	45	70	30	40	15
	T4 hohl	eP	-	10								
	T6 offen	eP	-	5	270	225	80	65	100	45	60	8
		eP	>5	10	260	215	80	65	95	45	60	
		eP	>10	25	250	200	75	60	95	45	60	
		eP	>5	5	255	215	75	65	95	45	60	
EN AW-6005A AlMgSi0,7 3.3210	T6	D	-	25	270	225	80	65	100	45	60	10
		S	-	25								
		eR	-	5								
		eP	-	-								
		D	>25	50	270	225	80	65	100	45	60	8
		S	>25	50								
		eR	-	5								
		eP	-	-								
		D	>50	100	260	215	80	65	95	45	60	8
		S	>50	100								
		eR	>5	10								
		eP	-	-								
	T4 offen	eP	-	25	180	90	55	45	70	30	40	15
	T4 hohl	eP	-	10								
	T6 offen	eP	-	5	270	225	80	65	100	45	60	8
		eP	>5	10	260	215	80	65	95	45	60	
		eP	>10	25	250	200	75	60	95	45	60	
		eP	>5	5	255	215	75	65	95	45	60	
EN AW-6106 - -	T6	D	-	-								
		S	-	-								
		eR	-	-								
		eP	-	10	250	200	75	60	95	45	60	8

¹⁾ bis ²²⁾ siehe Seite 134.Tabelle 45: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 15⁹⁴⁹⁴ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.138

Tabelle 5.1.18 Fortsetzung 5 von 9

Bezeichnung numerisch EN AW-... DIN- Kurzzeichen, DIN-Nummer 15	Zustand 42	Stangen D Stangen S Rohre e Profile e ⁹⁵ [mm]			R _m 44	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,05}	T _{0,2}	T _{0,01}	T _{0,05} A ₁
		von	bis									
EN AW-6012 AlMgSiPb 3,0/65	T6 T6510 T6511	D	-	150	310	260	95	75	110	55	70	8
		S	-	150								
		eR	-	30								
		eP	-	30								
		D	>150	200	260	200	80	65	95	45	60	8
		S	>150	200								
		eR	-	-								
		eP	-	-								
EN AW-6018 - -	T6 T6510 T6511	D	-	150	310	260	95	75	110	55	70	8
		S	-	150								
		eR	-	30								
		eP	-	30								
		D	>150	200	260	200	80	65	95	45	60	8
		S	>150	200								
		eR	-	-								
		eP	-	-								
EN AW-6351 - -	O H111	D	-	200	< 160	< 110	< 50	< 45	< 65	< 30	< 40	14
		S	-	200								
		eR	-	25								
		eP	-	alle								
	T4	D	-	200	205	110	60	55	80	35	50	14
		S	-	200								
		eR	-	25								
		eP	-	25								
	T5 offen T5 hohl	eP	-	5	270	230	80	65	100	45	60	8
		eP	-	-								
	T6 offen T6 hohl	eP	-	5	290	250	85	70	105	50	65	8
		eP	>5	25	340	255	90	70	110	50	65	10
EN AW-6060 AlMgSi0,5 3,5/206	T4	D	-	150	120	60	35	35	50	20	30	16
		S	-	150								
		eR	-	15								
		eP	-	25								
	T5	D	-	150	160	120	50	45	60	30	40	8
		S	-	150								
		eR	-	15								
		eP	-	5								
	T6	D	-	150	140	100	40	40	55	25	35	8
		S	-	150	190	130	55	50	75	35	45	8
		eR	-	15								
		eP	-	3								
	T64	D	-	25	170	140	50	45	65	30	40	8
		S	-	50								
		eR	-	15								
		eP	-	15								
	T66	D	-	150	215	160	65	55	80	35	50	8
		S	-	150								
		eR	-	15								
		eP	-	3								
		D	>5	25	195	150	60	50	75	35	45	8
		S	-	150								
		eR	-	15								
		eP	-	3								
EN AW-6061 AlMgSiCu 3,0/211	O H111	D	-	200	< 150	< 110	< 45	< 40	< 60	< 25	< 35	16
		S	-	200								
		eR	-	25								
		eP	-	25								
	T4	D	-	200	180	110	55	45	70	30	40	15
		S	-	200								
		eR	-	25								
		eP	-	25								
	T6	D	-	200	260	240	80	65	95	45	60	8
		S	-	200								
		eR	-	5								8
		eP	>5	25								10
		D	-	5								9
		S	-	5								10
		eR	>5	25								10
		eP	>5	25								10

⁹⁵ bis ⁹⁸ siehe Seite 134.Tabelle 46: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 16⁹⁵⁹⁵ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.139

Tabelle 5.1.18 Fortsetzung 6 von 9

Bezeichnung numerisch EN AW-... Kurzzeichen DIN-Nummer § 1	Zustand § 2	Stangen D Stangen S Rohre e Profile e ¹⁾ [mm]			R _m § 4	R _{p0,2}	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,1}	T _{0,2}	T _{0,1}	A %
			Stangen D Stangen S Rohre e Profile e ¹⁾ [mm]									
			von	bis								
EN AW-6261 - -	O H111	D	-	100	< 170	< 120	< 56	< 45	< 65	< 30	< 40	14
		S	-	100								
		eR	-	10								
	T4	D	-	100	180	100	55	45	70	30	40	14
		S	-	100								
		eR	-	10								
	T6	D	-	20	290	245	85	70	105	50	65	8
		S	>20	100								
		eR	>20	100								
		eP	>4	10								9
		eP	>5	10								8
		eP	>5	10								9
	T5 offen	eP	-	5	270	230	80	65	100	45	60	8
		eP	>5	25	260	220	80	65	95	45	60	9
		eP	>5	25	250	210	75	60	95	45	60	9
	T5 hohl	eP	-	5	270	230	80	65	100	45	60	8
		eP	>5	10	260	220	80	65	95	45	60	9
		eP	>5	10	260	220	80	65	95	45	60	9
	T6 offen	eP	-	5	290	245	85	70	105	50	65	8
		eP	>5	25	280	235	85	70	105	50	65	8
		eP	>5	10	290	245	85	70	105	50	65	8
	T6 hohl	eP	-	5	290	245	85	70	105	50	65	8
		eP	>5	10	270	230	80	65	100	45	60	9
		eP	>5	10	270	230	80	65	100	45	60	9
EN AW-6262 - -	T6	D	-	200	260	240	80	65	95	45	60	10
		S	-	200								
		eR	-	25								
EN AW-6063 - -	O H111	D	-	200	< 130	-	< 40	< 35	< 50	< 25	< 30	18
		S	-	200								
		eR	-	25								
	T4	D	-	150	130	65	40	35	50	25	30	14
		S	-	150								
		eR	-	10								
	T5	D	>150	200	120	65	35	35	50	20	30	12
		S	>150	200								
		eR	>10	25								
	T6	D	-	200	175	130	55	45	70	30	40	8
		S	-	200								
		eR	-	25								
	T66	D	-	150	160	110	50	45	65	30	40	7
		S	-	150	215	170	65	55	80	35	50	10
		eR	-	25								
	T64	D	>150	200	195	160	60	50	75	35	45	10
		S	>150	200								
		eR	>10	25								
	T66	D	-	200	245	200	75	60	90	40	55	8
		S	-	200								
		eR	-	25								
	T64	D	-	150	225	180	70	55	85	40	50	8
		S	-	150								
		eR	-	10								
T64	D	-	15	180	120	55	45	70	30	40	12	
	S	-	15									
	eR	-	15									

¹) bis ¹¹) siehe Seite 134.

Tabelle 47: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 17⁹⁶⁹⁶ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.140

Tabelle 5.1.18 Fortsetzung 7 von 9

Bezeichnung numerisch EN AW-... DIN- Kurzzeichen, DIN-Nummer ⁹⁷	Zustand	Stangen D Stangen S Rohre e Profile e ⁹⁸ [mm]			R _m [N/mm ²]	R _{p0,2} [N/mm ²]	σ _{0,01} [N/mm ²]	σ _{0,001} [N/mm ²]	σ _{0,01} [N/mm ²]	T _{0,2} [N/mm ²]	T _{0,1} [N/mm ²]	A [%]
			von	bis								
EN AW-6063 - -	O, H111	D	-	200	< 150	-	< 45	< 40	< 60	< 25	< 35	16
		S	-	200								
		eR	-	25								
		eP	-	-								
	T4	D	-	150	150	90	45	40	60	25	35	12
		S	-	150								
		eR	-	10								
		eP	-	25								
	T5	D	> 150	200	140	90	40	40	55	25	35	10
		S	> 150	200								
		eR	> 10	25								
		eP	-	-								
	T6	D	-	200	200	160	60	50	75	35	45	7
		S	-	200								
		eR	-	25								
		eP	-	10								
EN AW-6061 - -	T4	D	-	150	125	75	40	35	50	20	30	14
		S	-	150								
		eR	-	-								
		eP	-	50								
	T5	D	-	150	150	110	45	40	60	25	35	8
		S	-	150								
		eR	-	-								
		eP	-	50								
	T6	D	-	150	195	160	60	50	75	35	45	10
		S	-	150								
		eR	-	25								
		eP	-	50								
EN AW-6081 - -	T6	D	-	250	275	240	85	65	100	50	60	8
		S	-	250								
		eR	-	25								
		eP	-	-								
EN AW-6082 AlMgSi1 3.2315	O, H111	D	-	200	< 160	< 110	< 50	< 45	< 65	< 30	< 40	14
		S	-	200								
		eR	-	25								
		eP	-	alle								
	T4	D	-	200	205	110	60	55	80	35	50	14
		S	-	200								
		eR	-	25								
		eP	-	25								
	T5 offen T5 hohl	eP	-	5	270	230	80	65	100	45	60	8
		eP	-	-								
	T6 offen T6 hohl	eP	-	5	290	250	85	70	105	50	65	8
		eP	> 5	15	310	260	95	75	110	55	70	10

⁹⁸ bis ⁹⁹ siehe Seite 134.Tabelle 48: Festigkeitswerte für Aluminiumnetzwerkstoffe 18⁹⁷⁹⁷ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.141

Tabelle 5.1.18 Fortsetzung 9 von 9

Bezeichnung numerisch EN AW-... DIN- Kurzzeichen, DIN-Nummer *1	Zustand *2	Stangen D Stangen S Rohre e Profile e [mm] *3			R _m *4	R _e	σ _{W,zf}	σ _{Stck,m}	σ _{W,z}	ε _{W,z}	ε _{W,z}	A % *5
		von	bis									
EN AW-7075 AlZnMgCu1,5 3.4365	O H111	D	-	200	< 275	< 165	< 85	< 65	< 100	< 50	< 60	10
		S	-	200								
		eR	-	10								
		eP	-	-								
	T6 T6510 T6511	D	-	25	540	480	160	110	180	95	115	7
		S	-	25								
		eR	-	5								
		eP	> 25	60								
		D	> 25	100	560	500	170	110	185	95	115	7
		S	> 25	100								
		eR	5	10								
		eP	-	-								
		D	> 100	150	530	470	160	105	175	90	110	6
		S	> 100	150								
		eR	-	-								
		eP	-	25								
		D	> 150	200	470	400	140	100	160	80	100	5
		S	> 150	200								
		eR	-	-								
		eP	-	-								
	T73 T73510 T73511	D	-	25	485	420	145	100	165	85	100	7
		S	-	25								
		eR	5	25								
		eP	-	25								
		D	> 25	75	475	405	145	100	160	80	100	7
		S	> 25	75								
		eR	> 25	50								
		eP	-	-								
		D	> 75	100	470	390	140	100	160	80	100	6
		S	> 75	100								
		eR	> 5	25								
		eP	-	5								
		D	> 100	150	440	360	130	95	150	75	100	6
		S	> 100	150								
		eR	-	-								
		eP	-	-								

*1 bis ** siehe Seite 134.

Tabelle 50: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 20⁹⁹⁹⁹ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.143

Werkstoff	Erzeugnis	Zu- stand	Querschnitts- maß t	Prüf- richtung ^{*)}	R _m	R _p	$\sigma_{W,el}$	$\sigma_{S,el,el}$	$\sigma_{W,0.2}$	$\sigma_{W,1}$	$\sigma_{W,2}$	A %
EN AW-2014 Al Cu4SiMg	alle Schmiede- stücke	T4	$t \leq 150$	L	370	270	110	85	130	65	80	11
	Gesenk- schmiede- stücke	T6	$t \leq 50$ $50 < t \leq 100$	L	440	380	130	95	150	75	95	6
				oder T	430	370	130	95	150	75	95	3
				L	440	370	130	95	150	75	95	6
				oder T	430	360	130	95	150	75	95	3
	Freiform- schmiede- stücke	T652	$t \leq 75$	L	440	380	130	95	150	75	95	8
				oder LT	430	370	130	95	150	75	95	4
				oder ST	420	360	125	90	145	75	90	3
				L	420	370	125	90	145	75	90	7
			$75 < t \leq 150$	oder LT	420	360	125	90	145	75	90	4
				oder ST	410	350	125	90	145	70	90	3
				L	410	360	125	90	145	70	90	6
				oder LT	410	350	125	90	145	70	90	3
			$150 < t \leq 200$	oder ST	400	340	120	90	140	70	85	2
				L	420	260	125	90	145	75	90	8
				L	270	120	80	65	100	45	60	12
				oder T	260	110	80	65	95	45	60	10
				L	180	80	55	50	70	30	40	15
				L	310	260	95	75	110	55	70	6
				oder T	290	250	90	70	105	50	65	5
EN AW-5083 AlMg4,5Mn0,7	alle Schmiede- stücke	H112	$t \leq 150$	L	270	120	80	65	100	45	60	12
	alle Schmiede- stücke	H112	$t \leq 150$	L	180	80	55	50	70	30	40	15
	alle Schmiede- stücke	T6	$t \leq 100$	L	310	260	95	75	110	55	70	6
	alle Schmiede- stücke	T6	$t \leq 100$	oder T	290	250	90	70	105	50	65	5
	Gesenk- schmiede- stücke	T6	$t \leq 50$ $50 < t \leq 100$	L	510	430	155	105	170	90	105	7
				oder T	480	410	145	100	165	85	100	4
				L	500	425	150	105	170	85	105	6
				oder T	470	400	140	100	160	80	100	4
		T73	$t \leq 50$ $50 < t \leq 100$	L	455	385	135	95	155	80	95	6
				oder T	420	360	125	90	145	75	90	4
				L	445	375	135	95	150	80	95	6
				oder T	410	350	125	90	140	70	90	3
		Freiform- schmiede- stücke	$t < 75$	L	490	415	145	100	165	85	105	6
				oder LT	480	400	145	100</				

*1 L Richtung parallel zum Hauptfaserverlauf,
LT Richtung parallel zum größeren Querschnittsmaß (Breite),
T Richtung nicht parallel zum Hauptfaserverlauf,
ST Richtung parallel zum kleineren Querschnittsmaß (Dicke) (üblicherweise in Schmiegerichtung).

Tabelle 51: Festigkeitswerte für Aluminiumknetwerkstoffe 21¹⁰⁰

¹⁰⁰ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.144

Tabelle 5.1.20 Festigkeitskennwerte in MPa für Aluminiumgusswerkstoff, Sandgusslegierungen, getrennt gegossene Probestäbe, nach DIN EN 1706 (Juni 2010)

Legierungsbezeichnungen		Zst.	R _m	R _p	σ _{W,zst}	σ _{Sk,zst}	σ _{W,z}	σ _{Sk,z}	T _{W,z}	T _{W,z}	A ₅₀ %	Härte HBS
Numerisch	chemische Symbole											
EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	T4	300	200	90	60	130	65	100	5	90	
EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	T6 T64	300 280	200 180	90 85	60 55	130 125	65 65	100 95	3 5	95 85	
EN AC-21200	EN AC-Al Cu5MgMn	T4 T7	330 370	225 310	100 110	65 70	145 160	75 85	110 125	3 2	100 110	
EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi	F T6	140 240	70 180	40 70	30 50	65 105	30 55	50 80	3 3	50 85	
EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg	F T6	140 220	80 180	40 65	30 45	65 100	30 50	50 75	2 1	50 75	
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	T6	230	190	70	50	105	50	80	2	75	
EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	T6	250	210	75	50	110	55	85	1	85	
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	F T6	150 220	80 180	45 65	35 45	70 100	35 50	50 75	2 1	50 75	
EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)	F T6	150 220	80 180	45 65	35 45	70 100	35 50	50 75	2 1	50 75	
EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	F T6	160 220	80 180	50 65	35 45	75 100	35 50	55 75	1 1	50 75	
EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	T6	230	190	70	50	105	50	80	2	75	
EN AC-44000	EN AC-Al Si11	F	150	70	45	35	70	35	50	6	45	
EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)	F	150	70	45	35	70	35	50	4	50	
EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	F	150	70	45	35	70	35	50	5	50	
EN AC-44400	EN AC-Al Si9	F	170	80	50	37	75	38	60	4	50	
EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu4	F	150	90	45	35	70	35	50	1	60	
EN AC-45300	EN AC-Al Si5Cu1Mg	T4 T6	170 230	120 200	50 70	35 50	75 105	40 50	60 80	2 < 1	80 100	
EN AC-45500	EN AC-Al Si7Cu0,5Mg	T6	250	190	75	50	110	55	85	1	85	
EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	F	150	90	45	35	70	35	50	1	60	
EN AC-46400	EN AC-Al Si9Cu1Mg	F	135	90	40	30	60	30	45	1	60	
EN AC-46600	EN AC-Al Si7Cu2	F	150	90	45	35	70	35	50	1	60	
EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	F	150	80	45	35	70	35	50	1	50	
EN AC-51100	EN AC-Al Mg3(a)	F	140	70	40	30	65	30	50	3	50	
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	F	160	90	50	35	75	35	55	3	55	
EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)	F	160	100	50	35	75	35	55	3	60	
EN AC-71100	EN AC-Al Zn10Si8Mg	T1	210	190	65	45	95	47	70	1	90	

Tabelle 52: Festigkeitswerte für Aluminiumgusswerkstoff 1¹⁰¹

¹⁰¹ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.145

Tabelle 5.1.21 Festigkeitskennwerte in MPa für Aluminiumgusswerkstoff, Kokillengusslegierungen, getrennt gegossene Probestäbe, nach DIN EN 1706 (Juni 2010)

Legierungsbezeichnungen		Zst.	R _e	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,9}	T _{0,2}	T _{0,1}	A ₅₀ %	Härte HRN
Numerisch	chemische Symbole										
EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	T4	320	200	95	65	140	70	105	8	95
EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	T6 T64	330 320	220 180	100 95	65 65	145 140	75 70	110 105	7 8	95 90
EN AC-24200	EN AC-Al Cu5MgMn	T4 T7	400 410	240 325	120 125	75 75	170 175	90 90	130 135	7 8	95 90
EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi	F T6	170 260	70 180	50 80	35 55	75 115	40 60	60 90	5 5	50 85
EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg	F T6 T64	170 260 240	90 220 200	50 80 70	35 55 50	75 115 105	40 60 55	60 90 80	2,5 1 2	55 90 80
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	T6 T64	290 250	210 180	85 75	60 50	130 110	65 55	100 85	4 8	90 80
EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	T6 T64	320 290	240 210	95 85	65 60	140 130	70 65	105 100	3 6	100 90
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	F T6 T64	180 260 240	90 220 200	55 80 70	40 55 50	80 115 105	40 60 55	60 90 80	2,5 1 2	55 90 80
EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)	F T6 T64	180 260 240	90 220 200	55 80 70	40 55 50	80 115 105	40 60 55	60 90 80	2,5 1 2	55 90 80
EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	F T6 T64	180 240 200	90 200 200	55 70 70	40 50 50	80 105 105	40 55 55	60 80 80	1 1 2	55 80 80
EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	T6 T64	290 250	210 180	85 75	60 50	130 110	65 55	100 85	4 6	90 80
EN AC-44000	EN AC-Al Si11	F	170	80	50	35	75	40	60	7	45
EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)	F	170	80	50	35	75	40	60	5	55
EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	F	170	80	50	35	75	40	60	6	55
EN AC-44400	EN AC-Al Si9	F	180	90	55	40	80	40	60	5	55
EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu4	F	170	100	50	35	75	40	60	1	75
EN AC-45100	EN AC-Al Si5Cu3Mg	T4 T6	270 320	180 280	80 95	55 65	120 140	60 70	90 105	2,5 < 1	85 110
EN AC-45300	EN AC-Al Si5Cu1Mg	T4 T6	230 280	140 210	70 85	50 55	105 125	50 65	80 95	3 < 1	85 110
EN AC-45400	EN AC-Al Si5Cu3	T4	230	110	70	50	105	50	80	6	75
EN AC-45500	EN AC-Al Si7Cu0,5Mg	T6	320	240	95	65	140	70	105	4	100
EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	F	170	100	50	35	75	40	60	1	75
EN AC-46300	EN AC-Al Si7Cu3Mg	F	180	100	55	40	80	40	60	1	80
EN AC-46400	EN AC-Al Si9Cu1Mg	F T6	170 275	100 235	50 85	35 55	75 120	40 60	60 95	1 1,5	75 105
EN AC-46600	EN AC-Al Si7Cu2	F	170	100	50	35	75	40	60	1	75
EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	F	170	90	50	35	75	40	60	2	55
EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg	T5 T6	200 280	185 240	60 85	45 55	90 125	45 65	70 95	< 1 < 1	90 100
EN AC-51100	EN AC-Al Mg3(a)	F	150	70	45	35	70	35	50	5	50
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	F	180	100	55	40	80	40	60	4	60
EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)	F	180	110	55	40	80	40	60	3	65
EN AC-71100	EN AC-Al Zn10Si8Mg	T1	260	210	80	55	115	60	90	1	100

Tabelle 53: Festigkeitswerte für Aluminiumgusswerkstoff 2¹⁰²

¹⁰² Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.146

Tabelle 5.1.22 Festigkeitskennwerte in MPa für Aluminiumgusswerkstoff, Feingusslegierungen, getrennt gegossene Probestäbe, nach DIN EN 1706 (Juni 2010)

Legierungsbezeichnungen		Zst.	R _m	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,1}	T _{0,2}	T _{0,1}	A ₅ %	Härte HBS
Numerisch	chemische Symbole										
EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	T4	300	220	90	60	130	70	100	5	90
EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg	F T6	150 240	80 190	45 70	35 50	70 105	35 55	50 80	2 1	50 75
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	T6	260	200	80	55	115	60	90	3	75
EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	T6	290	240	85	60	130	65	100	2	85
EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)	F	150	80	45	35	70	35	50	4	50
EN AC-45200	EN AC-Al Si17Cu4Mg	F T3	200 295	180 260	60 90	43 60	90 130	45 65	70 100	1 1	90 125
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	F	170	95	50	35	75	40	60	3	55

Tabelle 5.1.23 Festigkeitskennwerte in MPa für Aluminiumgusswerkstoff, Druckgusslegierungen nach DIN EN 1706 (Juni 2010), nicht verbindlich, nur zur Information.

Legierungsbezeichnungen		Zst.	R _m	R _p	σ _{0,2}	σ _{0,01}	σ _{0,1}	T _{0,2}	T _{0,1}	A ₅ %	Härte HBS
Numerisch	chemische Symbole										
EN AC-43400	EN AC-Al Si10Mg(Fe)	F	240	140	70	50	105	55	80	1	70
EN AC-43500	EN AC-Al Si10MnMg	F	250	120	75	50	110	55	85	5	65
		T5	270	150	80	55	120	60	90	4	80
		T7	200	120	60	43	90	45	70	12	60
EN AC-44300	EN AC-Al Si12(Fe)(a)	F	240	130	70	50	105	55	80	1	60
EN AC-44400	EN AC-Al Si9	F	220	120	65	45	100	50	75	2	55
EN AC-44500	EN AC-Al Si12(Fe)(b)	F	240	140	70	50	105	55	80	1	60
EN AC-46000	EN AC-Al Si9Cu3(Fe)	F	240	140	70	50	105	55	80	< 1	80
EN AC-46100	EN AC-Al Si11Cu2(Fe)	F	240	140	70	50	105	55	80	< 1	80
EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu1	F	240	140	70	50	105	55	80	1	80
EN AC-46500	EN AC-Al Si9Cu3(Fe)(Zn)	F	240	140	70	50	105	55	80	< 1	80
EN AC-47100	EN AC-Al Si12Cu1(Fe)	F	240	140	70	50	105	55	80	1	70
EN AC-48100	EN AC-Al Si17Cu4Mg	F	220	160	65	45	100	50	75	< 1	90
EN AC-51200	EN AC-Al Mg9	F	200	130	60	43	90	45	70	1	70
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5Si2Mn	F	250	140	75	50	110	55	85	5	70

Tabelle 54: Festigkeitswerte für Aluminiumgusswerkstoff 3¹⁰³

¹⁰³ Quelle: Forschungskuratorium Maschinenbau (2012), S.147

Anlagen, Festigkeitskennwerte Magnesium

Werkstoff	$R_{p0,2}$ [MPa] min.	R_m [MPa] min.	A_{10} [%] min.	HB etwa	σ_{bw} [MPa] $N_G = 50 \cdot 10^6$	Bemerkung
EN-MBMgMn2	100	200	10	40		gut schweiß- und formbar
EN-MBMgAl3Zn	140	240	12	50		schweiß- und formbar
EN-MBMgAl6Zn	180	280	10	55		beschränkt schweißbar
EN-MBMgAl8Zn	210	300	10			höchste Festigkeit
G-MgAl6	80-120	180-240	8-12	50-65	70-90	hohe Dehnung und Schlagzähigkeit
EN-MCMgAl8Zn1	90-110	160-220	2-6	50-65	70-90	stoßbeanspruchte Teile
EN-MCMgAl8Zn1 (homogenisiert)	90-120	240-280	8-12	50-65	80-100	gute Gleiteigenschaften
EN-MCMgAl9Zn1 (homogenisiert)	110-140	240-280	6-12	55-70	80-100	höchste Werte für Zugfestigkeit
EN-MCMgAl9Zn1 (warm ausgelagert)	150-190	240-300	2-7	60-90	80-100	u. 0,2-Grenze

Tabelle 55: Festigkeitswerte für Magnesiumlegierungen¹⁰⁴

¹⁰⁴ Quelle: Klein, Bernd (2011), S.50

Anlagen, Festigkeitskennwerte Titan

Werkstoff	Zustand	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 [%]
TiAl 5 Sn 2,5	geglüht	880	840	18
TiAl 8 Mo 1 V 1	geglüht	1.030	950	16
TiAl 6 V 4	geglüht	950	840	14
	ausgehärtet	1.190	1.050	10
TiV 13 Cr 11 Al 3	geglüht	950	910	16
	ausgehärtet	1.300	1.230	8
	ausgehärtet	1.830	1.720	4

Tabelle 56: Festigkeitswerte für Titanlegierungen¹⁰⁵

¹⁰⁵ Quelle: Klein, Bernd (2011), S.53

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Stiwoll, den 22.02.2013

Gert Grillitsch

